МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

з вивчення дисципліни
«Дослідження та випробування технічних систем»
та виконання контрольних завдань,
спеціальності G11 "Машинобудування",
освітня програма G11.05 "Транспортні засоби" /
"Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні,
меліоративні машини і обладнання" для студентів усіх форм навчання

2026

Методичні вказівки з вивчення дисципліни «Дослідження та випробування технічних систем» та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності G 11.05 «Транспортні засоби», усіх форм навчання / Укл. : О. М. Артюх., М.В. Сидоренко Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2026. 119 с.

Укладач: М.В. Сидоренко, доцент, канд.техн.наук;
О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;

Рецензент: Р. О. Фролов, к.т.н.

Відповідальний за випуск: М. В. Сидоренко, доцент, канд. техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
«Деталі машин і ПТМ»
Протокол № 9 від 3.06. 2026 р.

Рекомендовано
до видання
НМК М-факультета
Протокол № 9 від 9.06. 2026 р

ЗМІСТ

Вступ 4
1 Робоча програма дисципліні 7
2 Методичні вказівки 12
2.1 Загальні вказівки. Мета викладання дисципліни 12
2.2 Методичні вказівки для студентів по освоєнню дисципліни 13
2.2.1 Тема 1. Технічна система 14
2.2.2 Тема 2. Еволюція технічних систем 20
2.2.3 Тема 3. Класифікація, властивості та оцінювання технічних систем 25
2.2.4 Тема 4. Етапи створення та використання технічних систем 35
2.2.5 Тема 5. Роль випробувань в процесі проектування та створення технічних систем 40
2.2.6 Тема 6. Основні поняття та класифікація контролю і випробувань складних технічних систем 48
2.2.7 Тема 7. Дослідження складних технічних систем з використанням моделей 54
2.2.8 Тема 8. Експериментальні дослідження складних технічних систем 61
2.2.9 Тема 9. Випробування складних технічних систем 67
2.2.10 Тема 10. Технічні засоби для проведення випробувань та досліджень технічних систем 74
2.2.11 Тема 11. Проведення технічних вимірювань при випробуваннях та дослідженнях технічних систем 81
2.2.12 Тема 12. Випробування технічних систем на надійність 88
2.2.13 Тема 13. Формування результатів випробувань 94
2.2.14 Тема 13. Ч.2.Сертифікація складних технічних систем 100
3 Завдання на контрольні роботи 108
3.1 Список варіантів контрольних робіт 108
4 Контрольні заходи з перевірки якості засвоєння навчального матеріалу дисципліни 115
5 Рекомендована література 116
Базова 116
Допоміжна 117
Інформаційні ресурси 119

ВСТУП

Дисципліна «Дослідження та випробування технічних систем» є ключовим елементом підготовки магістрів спеціальності G11 "Машинобудування", освітня програма G11.05 "Транспортні засоби" / "Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання" з фокусом на підйомно-транспортні та дорожні машини. Курс формує системне мислення, необхідне для розуміння сучасних автомобілів як складних технічних об'єктів, де кожен елемент – від двигуна до електронних систем – взаємодіє в єдиному механізмі. Вивчення дисципліни допомагає майбутнім інженерам не лише орієнтуватися в конструктивних рішеннях, але й передбачати їхню поведінку в реальних умовах експлуатації, виявляти потенційні проблеми ще на етапі проектування та обґрунтовано вдосконалювати техніку.

Курс розпочинається з фундаментальних понять: що таке технічна система, як вона влаштована, як еволюціонує з часом і які властивості визначають її якість. Студенти вчаться бачити автомобіль не як набір деталей, а як ієрархію підсистем – двигун, трансмісія, шасі, електроніка – кожна з яких має свої входи, виходи та взаємозв'язки з оточенням. Розглядається, як історично розвивалися транспортні засоби: від перших парових машин до сучасних гібридних і електричних установок, які тенденції – мініатюризація, автоматизація, екологізація – визначають майбутнє галузі. Особлива увага приділяється мотивації науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт: чому саме зараз потрібні нові рішення, які проблеми ринку, безпеки чи законодавства спонукають до змін.

Значна частина курсу присвячена життєвому циклу технічних систем – від ідеї до утилізації. Студенти аналізують, як на кожному етапі – від концептуального проектування до серійного виробництва й експлуатації – формується якість і надійність. Розглядаються особливості одиничного й серійного виробництва, розподіл завдань між конструкторами, технологами, випробувачами та експлуатаційниками. Саме тут стає зрозумілим, чому випробування – це не окремий етап, а наскрізний процес, що супроводжує всю розробку. Без даних з тестів неможливо обґрунтувати вибір матеріалів, конструктивних рішень чи режимів роботи.

Особливо важливим є блок, присвячений методам дослідження та випробувань. Студенти опановують як теоретичні, так і практичні

підходи: від фізичного та математичного моделювання до стендових, дорожніх і експлуатаційних тестів. Розглядаються прискорені та форсовані випробування, що дозволяють за короткий час оцінити довговічність, яка в реальних умовах вимірюється роками. Вивчаються технічні засоби – датчики, підсилювачі, реєструюче обладнання, стенди – і принципи їхнього калібрування, метрологічного забезпечення. Студенти вчаться правильно вимірювати зношення, температуру, тиск, вібрацію, обробляти масиви даних, перевіряти статистичні гіпотези, щоб результати були не просто цифрами, а обґрунтованою основою для висновків.

Окремий акцент робиться на надійності – одному з головних критеріїв сучасної техніки. За допомогою ймовірнісних моделей і статистичних методів студенти вчаться прогнозувати безвідмовність, ресурс, інтенсивність відмов, планувати випробування на надійність, обробляти результати й оформлювати їх у вигляді, прийнятному для сертифікації. Саме тут проявляється зв’язок з математикою, теорією ймовірностей і математичною статистикою – дисциплінами, які раніше здавалися абстрактними, але тепер стають інструментом інженерної практики.

Таким чином, курс не лише узагальнює попередні знання, а й показує їхню єдність. Студент починає бачити, як термодинаміка пояснює процеси в двигуні, опір матеріалів – міцність елементів, теорія надійності – довговічність, а стандарти – відповідність вимогам ринку. Це дозволяє не просто знати окремі дисципліни, а розуміти їхнє місце в загальній системі підготовки інженера.

Практична спрямованість курсу проявляється в лабораторних і практичних заняттях, де студенти працюють із реальним обладнанням кафедри: стендами для перевірки гальм, двигунів, трансмісій, вимірювальними комплексами. Використовуються сучасні інформаційні технології – Moodle для тестування, MATLAB і Ansys для моделювання, інтернет-ресурси для пошуку нормативів і аналогів. Самостійна робота включає аналіз літератури, підготовку звітів, виконання контрольних завдань, що розвивають навички наукового письма, аргументації, критичного мислення.

Вивчення дисципліни формує низку ключових компетентностей: здатність до пошуку й аналізу інформації з різних джерел, виявлення та вирішення проблем, застосування математичних методів надійності, проведення прикладних досліджень, інженерних розрахунків, аналізу

об’єктів і процесів, роботи з науково-технічною інформацією, у тому числі іноземною. Усе це відповідає програмним результатам навчання – від розрахунку гальмового шляху до обґрунтування сертифікаційних випробувань.

Курс готує не просто виконавців, а інженерів-дослідників, здатних брати участь у створенні нової техніки – від концепції до сертифікації. Він виховує відповідальність за якість, розуміння, що за кожним показником стоїть безпека людей, екологія, економіка. Випускник, який опанував дисципліну, зможе працювати в конструкторських бюро, випробувальних центрах, сертифікаційних органах, на автовиробництвах – скрізь, де потрібен системний підхід до техніки.

Таким чином, «Дослідження та випробування технічних систем» – це не просто набір методів, це філософія інженерної діяльності, де теорія зустрічається з практикою, а знання перетворюються на інструмент створення надійної, безпечної, конкурентоспроможної техніки. Курс завершується заліком, де студент демонструє не лише знання, а й уміння застосовувати їх у реальних інженерних задачах – від аналізу моделі до обґрунтування сертифікації. Це фінальний етап, що підтверджує готовність до професійної діяльності в галузі.

1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНІ

Наведені назви змістових модулів та найменування тем дисципліни для самостійного вивчення. Навчальним планом дисципліни, для самостійного вивчення тем лекцій, передбачено час для студентів денної форми навчання – 58 годин, заочної – 78 години.

Далі для кожної теми вказано час самостійної роботи студентів денної форми навчання. Також наведений перелік питань, які повинні бути самостійно розглянуті студентом при вивченні обраної теми.

Змістовий модуль 1. Основи системного аналізу та моделювання технічних систем

Тема 1. Технічна система
План лекції

1. Основні терміни та визначення
2. Сутність технічної системи як сукупності елементів
3. Відносність понять «елемент» і «система»
4. Структура технічної системи та її компоненти
5. Оточення технічної системи (реальне та повне)
6. Вхідні величини та їх види (матеріальні, енергетичні, інформаційні)
7. Вихідні величини та узагальнений вихід
8. Модель технічної системи та взаємозв'язки її елементів

Тема 2. Еволюція технічних систем
План лекції

1. Закономірності еволюції технічних систем
2. Тенденції технічного розвитку систем
3. Управління процесом технічного розвитку
4. Мотивація досліджень та розробок
5. Історичні етапи еволюції транспортних систем
6. Фактори, що впливають на еволюцію систем
7. Принципи прогнозування технічного розвитку
8. Взаємозв'язок еволюції з підвищенням надійності

Тема 3. Класифікація, властивості та оцінювання технічних систем

План лекції

1. Рівні класифікації технічних систем
2. Загальні ознаки технічних систем
3. Категорії властивостей систем
4. Відношення між властивостями
5. Перелік необхідних властивостей технічної системи
6. Методи оцінювання властивостей
7. Ієрархія властивостей у транспортних системах
8. Критерії вибору ключових властивостей для оцінки

Тема 4. Етапи створення та використання технічних систем

План лекції

1. Загальні положення про етапи створення систем
2. Стадії створення технічних систем різних типів виробництв
3. Послідовність стадій створення технічної системи
4. Розподіл стадій та операцій між виконавцями
5. Етапи використання технічної системи
6. Життєвий цикл системи від проектування до утилізації
7. Взаємозв'язок стадій створення з випробуваннями
8. Особливості етапів для серійного та одиничного виробництва

Тема 5. Роль випробувань в процесі проектування та створення технічних систем

План лекції

1. Задачі експериментальних досліджень
2. Організація експериментальних досліджень
3. Основні принципи побудови систем контролю
4. Принципи систем випробувань технічних систем
5. Роль випробувань у проектуванні
6. Роль випробувань у створенні систем
7. Інтеграція випробувань у життєвий цикл
8. Вплив результатів випробувань на конструктивні рішення

Тема 6. Основні поняття та класифікація контролю і випробувань складних технічних систем

План лекції

1. Випробування і контроль – основні терміни та визначення
2. Взаємозв'язок вимірювань, контролю та випробувань

3. Класифікації контролю
4. Класифікації випробувань
5. Загальна схема експериментальних досліджень
6. Класифікація відмов складних технічних систем
7. Класифікація дефектів технічних систем
8. Зв'язок класифікації з плануванням випробувань

Тема 7. Дослідження складних технічних систем з використанням моделей

План лекції

1. Мета моделювання при створенні складних систем
2. Задачі моделювання в дослідженнях
3. Загальні відомості про випробування з моделями
4. Випробування на основі фізичного моделювання
5. Випробування на основі математичного моделювання
6. Імітаційне моделювання складних систем
7. Переваги та недоліки різних типів моделювання
8. Застосування моделювання в транспортних системах

Змістовий модуль 2. Методологія експериментальних досліджень, випробувань та сертифікації

Тема 8. Експериментальні дослідження складних технічних систем

План лекції

1. Загальні відомості про експериментальні дослідження
2. Планування експериментальних досліджень
3. Проведення експериментальних досліджень
4. Етапи підготовки до експерименту
5. Вибір об’єкта та умов дослідження
6. Методи фіксації та реєстрації даних
7. Ризики та заходи безпеки під час експерименту
8. Аналіз попередніх результатів для планування

Тема 9. Випробування складних технічних систем

План лекції

1. Загальні відомості про випробування
2. Види випробувань: стендові
3. Види випробувань: ходові (натурні)

4. Види випробувань: експлуатаційні
5. Прискорені та форсовані випробування
6. Планування та програма випробувань
7. Методика проведення випробувань
8. Оформлення протоколів випробувань

Тема 10. Технічні засоби для проведення випробувань та досліджень технічних систем

План лекції

1. Загальні відомості про технічні засоби
2. Датчики: принцип дії та класифікація
3. Підсилювачі сигналів у вимірювальних системах
4. Реєструюче обладнання для випробувань
5. Стендове обладнання для транспортних систем
6. Програмне забезпечення для обробки сигналів
7. Калибрування та метрологічне забезпечення
8. Інтеграція засобів у комплексні системи

Тема 11. Проведення технічних вимірювань при випробуваннях та дослідженнях технічних систем

План лекції

1. Основні поняття та визначення вимірювань
2. Методи вимірювання зношення деталей
3. Модельний експеримент у вимірюваннях
4. Методи обробки експериментальних даних
5. Перевірка статистичних гіпотез
6. Похибки вимірювань та їх класифікація
7. Вибір методу залежно від параметра
8. Автоматизація вимірювального процесу

Тема 12. Випробування технічних систем на надійність

План лекції

1. Короткі відомості з теорії ймовірностей
2. Математична статистика у випробуваннях
3. Випадкові величини та їх характеристики
4. Статистичні методи досліджень надійності
5. Основні показники надійності
6. План і програма випробувань на надійність

7. Обробка результатів випробувань
8. Оформлення результатів надійності

Тема 13. Формування результатів випробувань. Сертифікація складних технічних систем

План лекції

1. Загальна структурна схема формування результатів
2. Точностні характеристики результатів
3. Формування результатів контрольних випробувань
4. Формування результатів повторних випробувань
5. Методи підвищення точності результатів
6. Узагальнення результатів на партію
7. Документальне оформлення результатів
8. Аналіз адекватності та чутливості методів
9. Основні поняття сертифікації
10. Статистичні методи при сертифікації
11. Особливості сертифікації складних систем
12. Сертифікація і менеджмент якості
13. Процедура отримання сертифіката відповідності

2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

2.1 Загальні вказівки. Мета викладання дисципліни

Дисципліна «Дослідження та випробування технічних систем» формує у майбутніх фахівців загальне уявлення про характер взаємодії елементів складних технічних систем, якими є сучасні крани, будівельні та дорожні машини. Оскільки до надійності та інших найважливіших характеристик технічних систем висуваються високі вимоги, також є необхідність їх подальшого вдосконалювання, все це ставить перед інженерно-технічними працівниками завдання одержання нових наукових знань, для цілеспрямованого пошуку й об'єктивної оцінки конструктивно-технічних рішень.

У свою чергу одержання нових знань пов'язане із проведенням двох рівнів досліджень: емпіричних, з використанням натурних експериментів, і теоретичних, на основі побудови математичних моделей, адекватних досліджуваному об'єкту.

Отже дисципліна «Дослідження та випробування технічних систем» відіграє в цьому процесі важливу роль, тому що в ній з досить високим ступенем узагальнення викладаються всі основні аспекти системного підходу й дається інструмент для орієнтації в обраній спеціальній області техніки.

Дана дисципліна дозволяє погодити між собою різні навчальні курси й пояснити студентам мету їх вивчення. Такий підхід буде сприяти кращому розумінню зв'язків між окремими елементами системи навчання й змістом багатьох підручників.

Дослідження технічних систем робить зрозумілою студенту всю систему навчання й проясняє місце окремих дисциплін, наприклад термодинаміки як спеціальної теорії процесів у теплових машинах, або опору матеріалів як загального вчення про міцність — в технічній системі в цілому.

Крім того, саме знання технічних систем дає системний огляд спеціальної проблематики, завдяки чому легше виявляються пробіли, які необхідно ліквідувати при повторенні навчального матеріалу, і одночасно висуває взаємозв'язки між спеціальними дисциплінами на передній план.

Мета курсу – формування у майбутніх фахівців загального уявлення про характер взаємодії елементів складних технічних систем,

якими є сучасні крани, будівельні та дорожні машини. Оскільки до надійності та інших найважливіших характеристик технічних систем висуваються високі вимоги, також є необхідність їх подальшого вдосконалювання, все це ставить перед інженерно-технічними працівниками завдання одержання нових наукових знань, для цілеспрямованого пошуку й об'єктивної оцінки конструктивно-технічних рішень.

2.2 Методичні вказівки для студентів по освоєнню дисципліни

Викладання дисципліни передбачає наступні форми організації навчального процесу: лекції, практичні заняття, самостійну роботу студента, консультації. Робота на практичних заняттях передбачає активну участь студента в освоєнні поставлених завдань. Для підготовки до занять рекомендується звертати увагу на проблемні питання, що піднімаються викладачем під час лекції, і групувати інформацію навколо них. Бажано виділяти у використовуваній літературі постановки питань, на які різними авторами можуть бути дані різні оцінки. На підставі постановки таких питань слід обирати аргументи на користь різних варіантів вирішення поставлених проблем.

У текстах авторів, таким чином, слід виділяти наступні компоненти:

- постановка проблеми;
- варіанти рішень;
- аргументи на користь тих або інших варіантів рішень.

На основі виділення цих елементів простіше становити власну аргументовану позицію по розглянутому питанню. При роботі з невідомими термінами необхідно звертатися до словників, у тому числі доступних в Інтернеті.

При написанні рефератів (контрольних робіт), у матеріалі слід виділити невелику кількість (не більш 5) проблем, що зацікавили Вас, і згрупувати матеріал навколо них. Слід домагатися чіткого розмежування окремих проблем і виділення їх часткових моментів.

При підготовці до практичних занять Вам може знадобитися матеріал, що вивчався раніше, тому варто звертатися до відповідних джерел (підручників, монографій, статей). Письмова домашня робота й завдання можуть бути індивідуальними й загальними.

При підготовці до заліку необхідно опиратися насамперед на лекційні заняття, а також на джерела, які розбиралися на заняттях протягом семестру.

Самостійна робота студента виконується за завданням і при методичному керівництві викладача, але без його особистої участі. Самостійна робота підрозділяється на самостійну роботу на аудиторних заняттях і на позааудиторну самостійну роботу.

Самостійна робота студента включає як повністю самостійне освоєння окремих тем (розділів) дисципліни, так і пророблення тем (розділів), освоюваних під час аудиторної роботи. Під час самостійної роботи, студенти читають і конспектують навчальну, наукову й довідкову літературу, виконують завдання, спрямовані на закріплення знань і відпрацьовування вмінь і навичок, готуються до поточного й проміжного контролю по дисципліні. При вивченні тем курсу наведених нижче, студентові необхідно повторити лекційний навчальний матеріал, вивчити рекомендовану літературу, а також навчальний матеріал, наявний в зазначених інформаційних ресурсах.

На завершальному етапі вивчення кожного модуля необхідно, скориставшись запропонованими питаннями для самоконтролю, перевірити якість засвоєння навчального матеріалу. У випадку утруднення у відповідях на поставлені питання рекомендується повторити навчальний матеріал. Після вивчення всіх модулів приступити до виконання контрольної роботи, керуючись методичними рекомендаціями з її виконання. По завершенню вивчення навчальної дисципліни в семестрі студент зобов'язаний пройти проміжну атестацію. Вид проміжної атестації визначається робочим навчальним планом. До проміжної атестації допускаються студенти, що виконали вимоги робочого навчального плану.

2.2.1 Тема 1. Технічна система

1. Основні терміни та визначення

При вивченні пункту 1 «Основні терміни та визначення» слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах базових понять системного підходу до технічних об’єктів, зокрема визначення системи як впорядкованої сукупності елементів з відносинами між ними. У мережі доступні численні освітні портали та електронні бібліотеки, де пояс-

нюється, що система завжди кінцева за кількістю елементів, а відносини можуть бути як прямими, так і відсутніми для ізольованих груп.

Особливу увагу звернути на розрізнення понять «технічна система» та «система» загалом, шукаючи приклади, де машина виступає системою для своїх деталей, але елементом для підприємства. Для закріплення рекомендується знайти схематичні зображення моделей систем у форматі PDF або на сайтах технічних вишів, де показано взаємодію елементів без зайвої деталізації.

Під час пошуку звертати увагу на матеріали, які пояснюють, що функціонування системи повністю визначається її структурою за умови замкненості, але однакова функція може реалізовуватися різними структурами. Це допоможе уникнути механічного запам'ятовування термінів і сформує розуміння їхньої практичної значущості при аналізі транспортних засобів.

Додатково шукати пояснення понять «властивість», «стан системи», «різниця станів», звертаючи увагу на те, що властивість – це будь-яка істотна ознака, а стан – сукупність значень властивостей у момент часу. У відкритих джерелах часто наводяться приклади з автомобілебудування, де маса, швидкість, форма є властивостями, а їхня комбінація визначає стан на дорозі.

Для самостійного контролю рекомендується скласти таблицю термінів з прикладами з реальних технічних об'єктів, наприклад, двигуна чи шасі, використовуючи лише доступні онлайн-ресурси без реєстрації. Такий підхід дозволить сформувати чітке уявлення про базові терміни без потреби в паперових носіях і підготує до розуміння складніших моделей у подальших пунктах.

2. Сутність технічної системи як сукупності елементів

При опрацюванні пункту 2 акцент робиться на розумінні системи як організованої множини, де елементи пов'язані відносинами. У відкритих джерелах шукати матеріали, які пояснюють, що елемент може бути системою нижчого рівня, а система – елементом вищого, наводячи приклади з транспортної техніки: поршень як елемент двигуна, двигун як елемент автокрана.

Звертати увагу на те, що ізольовані елементи також входять до системи, але не мають відносин з іншими. Для поглиблення рекомендується знайти діаграми, де показано розподіл автомобіля на підсистеми – механічні, електричні, гідравлічні – і їхню взаємодію. Під час

пошуку уникати складних математичних виразів, фокусуючись на графічних моделях, доступних на освітніх платформах. Важливо зрозуміти, що сукупність елементів утворює систему лише за наявності порядку, визначеного правилами. Шукати приклади, де порушення порядку призводить до втрати системних властивостей, наприклад, у разі несправності одного компонента трансмісії.

Для самостійної роботи рекомендується намалювати просту схему автомобіля як системи елементів, позначивши ключові зв'язки, використовуючи лише інформацію з відкритих джерел. Це допоможе візуалізувати сутність і підготує до аналізу відносності понять у наступному пункті. Додатково звертати увагу на пояснення, що система завжди кінцева, але може включати велику кількість елементів, як у сучасних електронних блоках керування.

3. Відносність понять «елемент» і «система»

При розгляді пункту 3 необхідно зосередитися на ієрархічності технічних об'єктів. У відкритих джерелах шукати матеріали, які ілюструють, як один об'єкт може бути елементом у великій системі та системою для менших компонентів. Наприклад, колесо – елемент ходової частини, але система для шини, диска, підшипників. Звертати увагу на приклади з різних рівнів: молекулярний для матеріалознавства, машинний для конструктора, підприємницький для проектувальника.

Рекомендується знайти схеми ієрархій у транспортних системах, де автомобіль є системою для двигуна, але елементом логістичного ланцюга. Під час пошуку фокусуватися на графічних моделях, які показують вкладеність систем без детальних розрахунків. Важливо зрозуміти, що відносність залежить від рівня розгляду, і один об'єкт не може бути одночасно елементом і системою в одному контексті.

Для закріплення шукати приклади поділу на підсистеми різної складності, наприклад, гальмівна система як підсистема шасі. Самостійно скласти ієрархію для гусеничної машини, використовуючи лише онлайн-джерела, позначивши рівні від деталі до комплексу. Це допоможе уникнути плутанини в подальшому аналізі структур і підготує до розуміння оточення системи.

4. Структура технічної системи та її компоненти

При вивченні пункту 4 слід звернути увагу на структуру як внутрішню організацію. У відкритих джерелах шукати пояснення, що

структура – це сукупність елементів і відносин, яка визначає функціонування. Звертати увагу на приклади, де одна функція реалізується різними структурами, наприклад, механічна чи гідравлічна трансмісія. Рекомендується знайти блок-схеми автомобіля, де показано компоненти – двигун, кузов, підвіска – та зв'язки між ними.

Під час пошуку фокусуватися на матеріалах, які пояснюють однозначність функціонування за фіксованою структурою. Для поглиблення шукати приклади зміни структури для покращення властивостей, наприклад, перехід до модульної конструкції. Самостійно намалювати структуру простої системи, наприклад, рульового управління, позначивши елементи та відносини. Це дозволить зрозуміти, що структура не визначається функцією однозначно, але повністю її детермінує. Додатково звертати увагу на компоненти, які забезпечують стійкість системи, як каркас кузова.

5. Оточення технічної системи (реальне та повне)

При опрацюванні пункту 5 акцент на розрізненні реального та повного оточення. У відкритих джерелах шукати матеріали, де реальне оточення визначається як системи з прямими зв'язками через входи-виходи, а повне включає геосферу, біосферу, техносферу. Звертати увагу на приклади, де автомобіль взаємодіє з дорогою, повітрям, водієм.

Рекомендується знайти схеми, які показують безпосереднє оточення – паливна система, дорога – та ширше – клімат, законодавство. Під час пошуку уникати абстрактних теорій, фокусуючись на практичних взаємодіях. Для закріплення скласти список елементів оточення для гусеничної техніки, наприклад, ґрунт, температура. Це допоможе зрозуміти обмеження розгляду оточення до релевантних факторів.

6. Вхідні величини та їх види (матеріальні, енергетичні, інформаційні)

При розгляді пункту 6 необхідно зосередитися на входах як зовнішніх відносинах. У відкритих джерелах шукати пояснення, що вхід – це дія, зв'язок чи параметр стану, поділений на матеріальний (паливо), енергетичний (електрика), інформаційний (сигнал). Звертати увагу на приклади з автомобіля: паливо, тиск повітря, команда з ECU. Рекомендується знайти діаграми узагальненого входу як вектора. Самостійно класифікувати входи для двигуна. Це підготує до аналізу виходів.

7. Вихідні величини та узагальнений вихід

При вивченні пункту 7 «Вихідні величини та узагальжений вихід» звертати увагу на виходи як відносини системи з оточенням. У відкритих джерелах шукати приклади: крутний момент, вихлоп, сигнал. Звертати увагу на узагальнений вихід як сукупність. Скласти список виходів для трансмісії.

8. Модель технічної системи та взаємозв'язки її елементів

При опрацюванні пункту 8 слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах графічних зображень загальної моделі системи, де чітко показано блокову схему з позначенням входів, виходів, структури та оточення. У мережі доступні освітні ресурси технічних напрямів, де така модель представлена у вигляді прямокутника з внутрішніми елементами, стрілками для відносин, зовнішніми стрілками для входів і виходів, а також умовним оточенням.

Звертати увагу на те, що модель є спрощеним відображенням реальної системи, яке дозволяє аналізувати взаємозв’язки без урахування всіх деталей, але з збереженням ключових відносин. Під час пошуку рекомендується знайти кілька варіантів моделей для різних технічних об’єктів, наприклад, для двигуна внутрішнього згоряння чи ходової частини автомобіля, і порівняти, як у кожному випадку позначаються елементи та їхні зв’язки.

Важливо зрозуміти, що взаємозв’язки між елементами можуть бути прямими, коли вихід одного є входом іншого, або опосередкованими через керуючі сигнали чи механічні передачі. Для закріплення матеріалу шукати пояснення, де модель використовується для прогнозування поведінки системи при зміні одного з параметрів, наприклад, при збільшенні вхідного тиску в гідравлічній системі.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де модель допомагає виявити критичні зв’язки, які впливають на загальну працездатність, наприклад, ланцюг від паливного насоса до форсунок. Рекомендується самостійно відтворити знайдену модель на папері чи в простій графічній програмі, позначивши всі елементи, відносини, входи матеріального, енергетичного та інформаційного характеру, а також виходи, включаючи бажані та небажані, такі як вихлопні гази чи шум. Це дозволить візуалізувати, як зміна одного зв’язку, наприклад, послаблення механічного кріплення, впливає на всю систему.

Додатково звертати увагу на пояснення, що модель не відтворює реальну систему повністю, але дає змогу аналізувати функціонування в замкненому контурі, де структура визначає поведінку. Під час пошуку уникати складних математичних описів, фокусуючись на блок-схемах, які доступні на сайтах з технічної освіти.

Для поглиблення розуміння шукати приклади, де модель застосовується для виявлення конфліктів між елементами, наприклад, між вимогами до потужності двигуна та маси кузова. Самостійна робота включає побудову моделі простої транспортної системи, наприклад, гальмівного контуру, з позначенням усіх взаємозв'язків і перевіркою, чи всі входи та виходи враховані.

Такий підхід допоможе сформувати навички системного моделювання, які будуть потрібні при вивченні еволюції та випробувань у подальших темах. Звертати увагу на те, що модель завжди абстрагується від несуттєвих властивостей, залишаючи лише ті, що впливають на цільову функцію. У відкритих джерелах часто пояснюється, як модель використовується для оцінки стану системи через вектор властивостей, де кожна компонента відповідає певному елементу чи зв'язку.

Для контролю розуміння рекомендується знайти приклади, де неправильна модель призвела до помилок у проектуванні, наприклад, ігнорування теплового розширення в механічних з'єднаннях. Це підкреслить важливість точного відображення взаємозв'язків. Загалом, робота з моделлю має бути спрямована на формування уявлення про систему як єдине ціле, де зміна одного елемента чи зв'язку впливає на весь об'єкт, що є основою для подальшого аналізу надійності та випробувань.

Під час пошуку матеріалів уникати застарілих чи надто спеціалізованих джерел, віддаючи перевагу чітким схемам і поясненням, доступним без реєстрації. Самостійне відтворення моделі дозволить не лише запам'ятати компоненти, але й зрозуміти логіку їхньої взаємодії в реальних умовах експлуатації транспортних засобів. Такий підхід забезпечить міцне засвоєння матеріалу та підготовку до практичного застосування при аналізі складних технічних систем.

Питання для самоперевірки

1. Які основні терміни використовуються для опису технічної системи?
2. У чому полягає сутність технічної системи?

3. Чим відрізняються поняття «елемент» і «система» як відносні категорії?
4. Як визначається структура технічної системи?
5. Яке розрізнення між реальним і повним оточенням системи?
6. Назвіть види вхідних величин та наведіть приклади для автомобіля.
7. Як формується узагальнений вихід технічної системи?
8. Які зв'язки існують між входами, виходами та оточенням?
9. Як модель технічної системи ілюструє взаємодію її компонентів?
10. Наведіть приклад властивостей технічної системи на основі її моделі.

2.2.2 Тема 2. Еволюція технічних систем

1. Закономірності еволюції технічних систем

При вивченні пункту 1 слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які пояснюють загальні закономірності розвитку техніки як поступового вдосконалення властивостей за фіксований період. У мережі доступні освітні ресурси, де наводяться приклади зміни технічних характеристик автомобілів від перших моделей до сучасних, зокрема зменшення маси, підвищення потужності, покращення аеродинаміки. Звертати увагу на те, що еволюція завжди спрямована на підвищення технічного рівня, який визначається сукупністю параметрів, що забезпечують більшу цінність об’єкта.

Під час пошуку рекомендується знайти графіки чи діаграми, які показують, як з часом змінюються ключові показники, наприклад, питома потужність двигуна чи коефіцієнт опору коченню. Важливо зрозуміти, що закономірності проявляються у циклічному характері: спочатку швидке зростання, потім стабілізація, а далі – стрибок при появі нової технології. Для закріплення шукати приклади еволюції конкретних систем, таких як гальмівні механізми від барабанних до дискових з ABS, і фіксувати, які властивості покращувалися на кожному етапі.

Самостійно скласти таблицю з трьома-чотирма поколіннями однієї системи, наприклад, трансмісії, позначивши зміни в масі, ККД, надійності. Це дозволить побачити закономірність переходу від простих до складніших рішень з одночасним зменшенням витрат. Додатково звертати увагу на пояснення, що еволюція не є лінійною, а зале-

жить від накопичення знань і потреб. У відкритих джерелах часто наводяться історичні огляди, де видно, як однакові проблеми вирішувалися по-різному в різні еп |. Для контролю розуміння рекомендується знайти приклади, коли ігнорування закономірностей призводило до застарілих конструкцій. Такий підхід сформує системне бачення еволюції як процесу, керованого внутрішніми та зовнішніми факторами, і підготує до аналізу тенденцій у наступному пункті.

2. Тенденції технічного розвитку систем

При опрацюванні пункту 2 акцент робиться на пошуку матеріалів, які описують основні напрямки вдосконалення техніки. У відкритих джерелах шукати пояснення таких тенденцій, як механізація, автоматизація, електрифікація, комп'ютеризація, без зайвих деталей.

Звертати увагу на приклади з транспортних систем: перехід від ручного до автоматичного керування коробкою передач, впровадження електроприводів у гібридних автомобілях. Рекомендується знайти схеми чи фото, які ілюструють етапи впровадження цих тенденцій, наприклад, від карбюраторних до інжекторних систем живлення. Важливо зрозуміти, що тенденції спрямовані на зменшення частки фізичної праці та підвищення ефективності.

Під час пошуку фокусуватися на матеріалах, які показують, як одна тенденція підсилює іншу, наприклад, комп'ютеризація дозволяє автоматизацію. Для самостійної роботи скласти список з п'яти тенденцій і підібрати по одному прикладу з автомобілебудування, наприклад, використання нових матеріалів для зменшення маси. Це допоможе побачити, що тенденції не ізольовані, а взаємопов'язані.

Додатково звертати увагу на пояснення, що тенденції формуються під впливом суспільних цілей, але реалізуються лише за наявності технічних можливостей. У відкритих джерелах часто наводяться прогнози розвитку, які базуються на цих тенденціях. Самостійно намалювати стрілку часу з позначенням тенденцій для електромобілів. Такий підхід забезпечить розуміння технічного розвитку як спрямованого процесу.

3. Управління процесом технічного розвитку

При розгляді пункту 3 необхідно зосередитися на пошуку матеріалів про координацію етапів від ідеї до впровадження. У відкритих джерелах шукати пояснення, як плануються НДДКР, розподіляються

ресурси, контролюється хід робіт. Звертати увагу на приклади з автомобільної промисловості, де управління включає етапи концепції, прототипу, серійного виробництва. Рекомендується знайти блок-схеми процесів розробки, які показують взаємодію відділів.

Важливо зрозуміти, що управління забезпечує відповідність розвитку потребам ринку та технічним можливостям. Під час пошуку фокусуватися на матеріалах, які пояснюють роль планування в скороченні циклів. Для закріплення скласти просту схему управління для нової моделі шин. Це дозволить побачити послідовність рішень.

4. Мотивація досліджень та розробок

При вивченні пункту 4 слід шукати матеріали про причини ініціації НДДКР. У відкритих джерелах звертати увагу на економічні, технічні, соціальні стимули. Звертати увагу на приклади, коли конкуренція чи законодавчі вимоги спонукали до розробок, наприклад, екологічні норми для двигунів.

Рекомендується знайти статті про мотивацію переходу до електромобілів. Важливо зрозуміти, що мотивація поєднує технічний потенціал з економічною вигодою. Самостійно скласти список мотивів для гібридної трансмісії.

5. Історичні етапи еволюції транспортних систем

При опрацюванні пункту 5 акцент на пошуку хронологічних оглядів розвитку автомобілів. У відкритих джерелах шукати матеріали від парових машин до сучасних автономних систем. Звертати увагу на ключові етапи: поява ДВЗ, масове виробництво, електроніка. Рекомендується знайти діаграми етапів для FIAT чи Ford. Для закріплення скласти хронологію з п’яти етапів для колісних машин.

6. Фактори, що впливають на еволюцію систем

При вивченні пункту 6 слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які пояснюють зовнішні та внутрішні чинники, що визначають напрямок і швидкість технічного прогресу. У мережі доступні освітні ресурси, де акцентується увага на економічних можливостях, технічному рівні та зацікавленості суспільства як основних рушіях розвитку.

Звертати увагу на те, що економічні фактори включають витрати

на виробництво, ринковий попит і конкуренцію, тоді як технічні – наявність нових матеріалів, технологій обробки та знань. Під час пошуку рекомендується знайти приклади з автомобілебудування, де екологічні вимоги змусили зменшити викиди, а конкуренція – підвищити паливну ефективність. Важливо зрозуміти, що фактори діють у комбінації: лише за наявності всіх трьох механізм НДДКР запускається повною мірою.

Для поглиблення шукати статті про вплив законодавства на еволюцію гальмівних систем чи шин, де показано, як нормативні зміни прискорили впровадження нових рішень. Самостійно скласти схему взаємодії факторів для однієї системи, наприклад, двигуна, позначивши стрілками вплив економіки на технічні рішення та зворотний зв'язок через мотивацію. Це дозволить побачити, що відсутність одного фактора гальмує прогрес, навіть за наявності інших.

Додатково звертати увагу на пояснення соціальних факторів, таких як зміна потреб у безпеці чи комфорті, які формують попит на нові властивості. У відкритих джерелах часто наводяться історичні приклади, де кризи чи війни прискорювали розвиток, наприклад, поява реактивних двигунів. Рекомендується знайти графіки зміни попиту на електромобілі під впливом цін на пальне.

Для контролю розуміння скласти список факторів для гусеничної техніки, враховуючи специфіку ґрунтів і умов експлуатації. Такий підхід сформує розуміння еволюції як результату балансу сил, а не випадкових винаходів, і підготує до прогнозування в наступному пункті. Уникаючи складних формул, фокусуватися на логічних зв'язках між факторами та змінами в конструкціях транспортних засобів.

7. Принципи прогнозування технічного розвитку

При опрацюванні пункту 7 акцент робиться на пошуку матеріалів про методи передбачення майбутніх змін у техніці. У відкритих джерелах шукати пояснення принципів, заснованих на аналізі тенденцій, закономірностей і факторів. Звертати увагу на те, що прогнозування спирається на екстраполяцію існуючих даних, моделювання сценаріїв і оцінку ймовірностей. Під час пошуку рекомендується знайти приклади прогнозів у автомобільній галузі, де на основі зменшення маси та зростання ККД передбачали появу гібридів.

Важливо зрозуміти, що принципи включають системний аналіз минулого, виявлення циклічності та врахування обмежень ресурсів. Для закріплення шукати статті про прогнози автономного керування,

де показано етапи від адаптивного круїз-контролю до повної автономії. Самостійно скласти простий прогноз для трансмісії на 10 років, використовуючи тенденції автоматизації та електрифікації, позначивши ключові етапи. Це допоможе відпрацювати принцип екстраполяції.

Додатково звертати увагу на пояснення, що прогнозування враховує небажані ефекти, такі як зростання складності чи витрат на обслуговування. У відкритих джерелах часто наводяться методи сценарного планування, де розглядаються оптимістичний, песимістичний і базовий варіанти. Рекомендується знайти схеми прогнозування для екологічних норм, які впливають на двигуни. Для контролю скласти таблицю принципів з прикладами для ходової частини. Такий підхід забезпечить навички обґрунтованого передбачення, необхідні для планування НДДКР.

8. Ваємозв'язок еволюції з підвищенням надійності

При розгляді пункту 8 необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які показують, як розвиток техніки супроводжується зростанням безвідмовності та ресурсу. У відкритих джерелах шукати пояснення, що еволюція завжди включає покращення надійності як ключової властивості. Звертати увагу на приклади з транспортних систем, де перехід від механічних до електронних компонентів зменшив кількість відмов, але збільшив вимоги до діагностики.

Під час пошуку рекомендується знайти графіки зміни MTBF для двигунів чи гальм за десятиліття. Важливо зрозуміти, що підвищення надійності є наслідком накопичення знань про відмови та їхні причини. Для поглиблення шукати статті про еволюцію матеріалів, які зменшують зношення. Самостійно скласти діаграму зв’язку еволюційних етапів автомобіля з показниками надійності, наприклад, від карбюратора до інжектора. Це дозволить побачити, що кожний крок розвитку вирішує проблеми попереднього.

Додатково звертати увагу на пояснення, що надійність зростає нелінійно: спочатку швидко, потім повільніше через межі матеріалів. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де еволюція до модульних конструкцій спростила ремонт. Рекомендується знайти дані про ресурс сучасних трансмісій порівняно з минулими. Для контролю скласти список заходів підвищення надійності на кожному етапі еволюції шин. Такий підхід сформує розуміння надійності як інтегральної частини еволюції.

Питання для самоперевірки

1. Які основні закономірності еволюції технічних систем?
2. Назвіть ключові тенденції технічного розвитку сучасних транспортних засобів.
3. Як здійснюється управління процесом технічного розвитку?
4. У чому полягає мотивація досліджень та розробок у машинобудуванні?
5. Які історичні етапи еволюції пройшли колісні транспортні засоби?
6. Які зовнішні фактори впливають на еволюцію технічних систем?
7. Які принципи лежать в основі прогнозування технічного розвитку?
8. Як еволюція систем пов'язана з підвищенням їх надійності?
9. Наведіть приклад еволюційного переходу в двигунах внутрішнього згоряння.
10. Як мотивація НДДКР впливає на вибір конструктивних рішень?

2.2.3 Тема 3. Класифікація, властивості та оцінювання технічних систем

При розгляді цієї теми треба звернути особливу увагу на те, що класифікація технічних систем по різних визначальних ознаках вносить досить стрункий порядок у їхню велику безліч і дозволяє краще орієнтуватися. Як наслідок цього з'являється можливість вивчення передового досвіду, що дозволяє часом виявити між досить далекими технічними системами цікаві, досі сховані відносини.

Тому необхідно для початку розглянути ті аспекти, які беруться до уваги при проведенні класифікації (систематизації) технічних систем, використовуючи характерні приклади. Властивості та їх загальні відносини вивчаються в природознавстві й техніці, де вони виражаються або формулами, або на словах. Для здійснення необхідної дії конкретної технічної системи загальні відносини часто недостатні.

У випадку складних процесів загальні відносини на практиці щораз конкретизують стосовно до наявних умов. Наприклад, для поширення тепла є формули переносу тепла теплопровідністю, випромінюванням і конвекцією. Отже, слід враховувати надзвичайну складність відносин між різними факторами і властивостями.

1. Рівні класифікації технічних систем

Опрацьовуючи це питання, необхідно глибоко усвідомити, що класифікація є не просто формальним розподілом об'єктів за групами, а фундаментальним інструментом системного аналізу, що дозволяє упорядкувати величезний обсяг знань про різноманіття технічних рішень та їхніх властивостей. Систематизація технічних систем вибудовується за ієрархічним принципом, що включає декілька взаємопов'язаних рівнів, починаючи від загального призначення і закінчуючи специфічними конструктивними особливостями.

На найвищому, макрорівні, класифікація найчастіше базується на цільовому призначенні або галузі застосування, що визначає основну функцію системи в суспільстві чи виробництві; прикладами є транспортні системи, енергетичні системи, виробничі системи чи інформаційні системи. Кожен із цих макрокласів об'єднує технічні об'єкти з подібними суспільними функціями, але може включати радикально різні за внутрішньою будовою зразки, що вимагає подальшої деталізації.

Наступний, мезорівень, передбачає систематизацію за принципом дії або видом використаної енергії та технологічних процесів, що відбуваються всередині системи, як-от механічні, гідравлічні, електричні чи пневматичні системи. Цей рівень є ключовим для інженера-дослідника, оскільки він орієнтує на використання відповідних фізико-математичних моделей та експериментальних методів, характерних для даного класу явищ. Наприклад, випробування електричних машин вимагають інших підходів та обладнання, ніж випробування механічних трансмісій, хоча обидві системи можуть бути елементами одного транспортного засобу.

Нарешті, мікрорівень класифікації зосереджується на детальних структурних елементах, компонентній базі, використовуваних матеріалах або специфічних підфункціях, що реалізуються в рамках підсистеми; це може бути класифікація за типом підшипників, виду легованої сталі чи схемою керування мікропроцесором.

Розуміння цих рівнів є критично важливим, оскільки дозволяє коректно інтерпретувати передовий досвід та результати випробувань: успішне рішення, знайдене на мікрорівні в одній галузі (наприклад, новий спосіб діагностики в авіації), може бути перенесено та адаптовано для використання на аналогічних структурних елементах у зовсім іншій

макросистемі (наприклад, у залізничному транспорті), що значно прискорює технічний розвиток та оптимізацію витрат на дослідження. Таким чином, грамотна багатоступенева класифікація виступає основою для уніфікації термінології, вибору адекватних методів випробувань та прогнозування розвитку систем на основі аналізу тенденцій у суміжних класах об'єктів.

2. Загальні ознаки технічних систем

При вивченні загальних ознак технічних систем слід сфокусувати увагу на тих фундаментальних властивостях, які відрізняють технічну систему від простої сукупності елементів і роблять її об'єктом системного аналізу. Серед ключових ознак виділяють цілісність та емерджентність. Цілісність означає, що система функціонує як єдине ціле, і її властивості не можуть бути зведені до простої суми властивостей її складових частин.

Емерджентність (снонімами до слова «емерджентність» є «системний ефект», «синергія», «холізм» та «супервенція», оскільки всі вони описують властивості, що виникають у системі як цілому, а не у її окремих частинах) у свою чергу, є проявом цієї цілісності: це виникнення у системи нових, якісно відмінних властивостей на системному рівні, які відсутні у будь-якого з її елементів, взятих ізольовано.

Наприклад, автомобіль володіє здатністю до пересування із заданою швидкістю, що є емерджентною властивістю, відсутньою у двигуна, шасі чи коліс окремо. Наступною важливою ознакою є цілеспрямованість, яка вказує на те, що технічна система завжди створюється для досягнення певної мети, сформульованої людиною, що і визначає її функцію та параметри.

Ця цілеспрямованість є керівним принципом на всіх етапах життєвого циклу, включаючи проектування, виготовлення та випробування, де оцінюється ступінь досягнення заданої мети. Не менш значущою є структурованість, що характеризує внутрішню організацію системи, тобто наявність елементів та стійких зв'язків (відносин) між ними. Структура визначає спосіб функціонування системи та її поведінку, а також слугує основою для розбиття системи на підсистеми, що необхідно для послідовного дослідження і випробувань.

Крім того, будь-яка технічна система є відкритою, що проявляється в її взаємозв'язку з оточенням – вона обмінюється з навко-

лишнім середовищем матеріальними, енергетичними та інформаційними потоками, які виступають як вхідні та вихідні величини. Дослідження цих зв'язків, зокрема впливу оточення на систему (перешкоди) та впливу системи на оточення (екологічність, безпека), становить левову частку програми випробувань.

Нарешті, слід пам'ятати про ієрархічність – здатність системи бути частиною більшої системи і, водночас, містити в собі менші підсистеми та елементи, що вимагає багаторівневого підходу як до моделювання, так і до організації експериментальних досліджень. Розуміння цих загальних ознак дозволяє коректно формулювати задачі випробувань, спрямовуючи дослідження не лише на окремі елементи, а й на вивчення складності відносин та синергетичних ефектів, що виникають на рівні цілісної системи.

3. Категорії властивостей систем

Опановуючи матеріал про властивості систем, необхідно розуміти, що властивості є істотними ознаками об'єкта , які дозволяють його ідентифікувати, описувати його стан та оцінювати його цінність. Для зручності аналізу і планування досліджень властивості технічних систем поділяють на кілька основних категорій, хоча на практиці вони тісно переплітаються, і зміна однієї властивості часто неминуче впливає на інші. Насамперед, виділяють функціональні властивості, які безпосередньо характеризують здатність системи виконувати своє цільове призначення, тобто її здатність що-небудь робити, функціонувати.

Сюди відносять показники продуктивності, швидкодії, точності виконання операцій, а також якісні характеристики кінцевого продукту чи послуги, що надається системою. Саме функціональні властивості є першочерговим об'єктом оцінювання під час приймальних і сертифікаційних випробувань. Другою важливою категорією є експлуатаційні властивості, які описують поведінку системи протягом її життєвого циклу в реальних умовах використання.

До цієї категорії входять такі критично важливі властивості, як надійність (безвідмовність, довговічність), ремонтопридатність (можливість відновлення робочого стану), безпека (захищеність користувачів та оточення) та ергономічність (зручність взаємодії людини-оператора з системою). Ці властивості мають переважно імовірнісний характер, вимагаючи специфічних методик випробувань, заснованих на

статистиці та теорії надійності, а їхнє оцінювання часто є найбільш тривалим та ресурсоємним етапом досліджень.

Третя категорія – конструктивні (технічні) властивості, які описують фізичні та структурні характеристики системи, такі як розміри, маса, форма, стабільність , а також технологічність (легкість і економічність виготовлення) і транспортабельність. Хоча ці властивості є похідними від проектних рішень, вони безпосередньо впливають на функціональні та експлуатаційні характеристики, виступаючи їхніми фізичними носіями.

Четверта категорія – економічні властивості, які включають вартість розробки, виробництва, експлуатації та утилізації, відображаючи загальну ефективність системи з точки зору фінансових витрат. У сукупності, ці категорії формують вектор властивостей, який визначає стан системи та дозволяє проводити сукупну оцінку її якості чи цінності.

4. Відношення між властивостями

При аналізі технічних систем стає очевидно, що властивості не існують ізольовано, а перебувають у складних, часто нелінійних і суперечливих відносинах, що суттєво ускладнює процес проектування та випробувань. Розуміння цих взаємозв'язків є центральним моментом у методиці досліджень, оскільки дозволяє свідомо керувати компромісними рішеннями, які неминуче виникають при оптимізації системи. Найбільш поширеними є компромісні (конфліктні) відношення, де поліпшення однієї властивості відбувається за рахунок погіршення іншої, і навпаки.

Класичним прикладом є відношення між швидкістю транспортної системи та її паливною ефективністю, або між високою надійністю та низькою собівартістю виробництва: збільшення ресурсу деталі, як правило, вимагає застосування дорожчих матеріалів або ускладнення технологічного процесу, що підвищує кінцеву вартість.

Задачею системного аналізу і випробувань є пошук оптимального компромісу, який забезпечує найкраще співвідношення між конфліктуючими властивостями відповідно до цілей системи. Існують також суперечливі відношення, які виникають на більш глибокому, принциповому рівні, коли одночасна реалізація двох бажаних властивостей у межах однієї структури стає неможливою без принципової зміни конструктивної схеми. Наприклад, підвищення жорсткості конструкції

може конфліктувати з вимогою до її легкості та здатності до демпфування вібрацій. Протилежністю до конфліктних є синергетичні (позитивні) відношення, при яких поліпшення однієї властивості позитивно впливає на іншу.

Прикладом може бути застосування сучасних композитних матеріалів, що одночасно збільшує міцність конструкції і знижує її масу, що, своєю чергою, покращує динамічні характеристики та паливну ефективність. Крім того, виділяють відносини обмеження, коли одна властивість встановлює граничні рамки для іншої: наприклад, вимоги екологічної безпеки (норми викидів) жорстко обмежують діапазон можливих технічних рішень для двигуна, не дозволяючи оптимізувати його роботу виключно за критерієм потужності.

Виявлення та кількісна оцінка цих відношень здійснюється саме на етапах експериментальних досліджень, коли, застосовуючи методи планування експерименту, дослідник отримує функціональні залежності, що зв'язують вхідні параметри системи з її вихідними властивостями, що дозволяє перейти від загальних відносин до конкретизованих залежностей, що відповідають наявним умовам.

5. Перелік необхідних властивостей технічної системи

Формування вичерпного та обґрунтованого переліку необхідних властивостей є першочерговим завданням на стадії розробки технічного завдання і має вирішальне значення для успіху всього проекту, оскільки саме цей перелік визначає програму випробувань та критерії оцінки результатів. Цей перелік не є статичним і залежить від численних факторів, включаючи цільове призначення системи, умови її експлуатації, нормативно-правові вимоги та економічні обмеження.

Дослідник повинен враховувати, що перелік властивостей включає не лише основні, функціонально-обумовлені властивості (такі як потужність, швидкість, пропускна здатність), які описують безпосереднє виконання місії, але й обмежувальні властивості, що встановлюють допустимі межі для безпечної та економічно доцільної експлуатації. Ключовими серед цих обмежувальних властивостей є надійність (з гарантованою ймовірністю безвідмовної роботи протягом заданого терміну), безпека (відсутність неприпустимого ризику для людей, майна та довкілля) та екологічність (відповідність нормам викидів, шуму, вібрації). Ігнорування або недостатня увага до цих обмежуваль-

них властивостей може призвести до неможливості сертифікації системи або її високої вартості володіння.

Крім того, сучасний підхід вимагає включення до переліку властивостей, що відображають зручність роботи та обслуговування, а саме ергономічність та ремонтопридатність, які безпосередньо впливають на експлуатаційні витрати та загальну задоволеність користувача. Для систем серійного виробництва особливе місце займає технологічність, тобто здатність конструкції бути виготовленою з мінімальними витратами часу та ресурсів, що вимагає постійного контролю конструктора за всіма стадіями створення виробу.

Динамічність цього переліку випливає з того, що вимоги до системи змінюються протягом її життєвого циклу: на етапі проектування фокусуються на функціональних властивостях, на етапі виробництва – на технологічності та контролі якості, а на етапі експлуатації на перший план виходять надійність, ремонтопридатність та екологічність. Таким чином, перелік необхідних властивостей є інтегральним документом, що синтезує технічні, економічні, соціальні та нормативні вимоги, і слугує основою для розробки адекватної програми випробувань, спрямованої на об'єктивне вимірювання кожного з цих параметрів, оскільки для сукупної характеристики об'єкта вибирають істотні властивості.

6. Методи оцінювання властивостей

Оцінювання властивостей технічних систем є багатогранним процесом, що вимагає застосування різноманітних методик, які можна умовно поділити на три основні групи: експериментальні, розрахунково-аналітичні та експертні. Експериментальні методи є центральними в контексті даного курсу, оскільки вони передбачають безпосереднє вимірювання характеристик системи в реальних або штучно відтворених умовах.

До них відносяться стендові випробування, натурні (ходові) випробування та експлуатаційні випробування, які дозволяють отримати кількісні значення фізичних величин, що характеризують функціональні та експлуатаційні властивості (швидкість, потужність, рівень шуму, знос деталей).

Сучасні експериментальні дослідження ґрунтуються на використанні складних технічних засобів, таких як датчики для збору первинної інформації , реєструюче обладнання та спеціалізовані стенди, а та-

кож методах планування експерименту для мінімізації кількості дослідів і підвищення достовірності результатів.

Друга група – розрахунково-аналітичні методи – передбачає використання математичних моделей та теоретичних залежностей для прогнозування та оцінки властивостей системи без необхідності проведення фізичних випробувань. Це моделювання, що ґрунтується на законах, що зв'язують фізичні величини у вигляді функціоналів або рівнянь, часто застосовується на ранніх етапах проектування, коли натурний зразок ще відсутній, або для оцінки тих властивостей, випробування яких є надто дорогим чи небезпечним.

Аналітичні методи включають комп'ютерне моделювання, зокрема метод скінченних елементів для аналізу міцності, або імітаційне моделювання для вивчення складних динамічних процесів. Третя група – експертні методи – застосовується для оцінки невимірюваних або якісних властивостей, які складно або неможливо виразити у фізичних величинах, таких як щільність компонування, зручність користування, раціональність форми.

Ці методи ґрунтуються на знаннях, досвіді та інтуїції висококваліфікованих фахівців, які виставляють оцінки за спеціальними шкалами, часто використовуючи, наприклад, п'ятибальну систему для комплексної оцінки стійкості чи керованості. Комплексне оцінювання властивостей складної технічної системи завжди передбачає інтеграцію всіх трьох груп методів, що дозволяє отримати сукупну оцінку, що враховує як кількісні, так і якісні характеристики.

7. Ієрархія властивостей у транспортних системах

Розглядаючи транспортні системи як характерний приклад складних технічних систем, стає очевидною необхідність вибудовування чіткої ієрархії їхніх властивостей, де кінцева ціль – ефективне, безпечне та економічне переміщення об'єкта (пасажира чи вантажу) – домінує над усіма іншими характеристиками.

На вершині цієї ієрархії знаходиться функціональна ефективність транспортування, яка розкладається на ключові підвластивості, що безпосередньо визначають конкурентоспроможність системи. Першочерговим є, безумовно, безпека, яка у транспортних системах переходить із категорії бажаної властивості в категорію обов'язкового обмеження, що жорстко контролюється національними та міжнародними стандартами. Сюди відноситься як активна безпека (здатність запобігти аварії,

наприклад, керованість, стійкість, гальмівні властивості), так і пасивна безпека (здатність мінімізувати наслідки аварії, що оцінюється за допомогою динамічних стендових випробувань кузовів, що імітують зіткнення). Наступною за важливістю є надійність, яка для транспортних систем часто вимірюється не лише безвідмовністю агрегатів, а й готовністю до експлуатації, що є критичним показником для комерційних перевезень.

Далі в ієрархії слідують динамічні та експлуатаційні властивості, такі як максимальна швидкість , прохідність, маневреність, а також паливна (енергетична) ефективність, яка сьогодні є вирішальним економічним фактором. Ці властивості тісно пов'язані з технічним рівнем системи , який відображає сукупну цінність виробу, що змінюється з часом у зв'язку з ростом потреб та впровадженням нових технологій.

У підпорядкуванні цих основних властивостей знаходяться властивості компонентів та підсистем: надійність двигуна, ефективність трансмісії , характеристики шин тощо, які мають бути досліджені на стендах перед інтеграцією в цілісну систему.

Таким чином, ієрархія властивостей у транспортних системах являє собою структуровану залежність, де ключові системні характеристики диктують вимоги до функцій і властивостей їхніх складових елементів, а програма випробувань повинна забезпечувати послідовну перевірку цих вимог на всіх рівнях – від агрегату до кінцевого експлуатаційного показника.

8. Критерії вибору ключових властивостей для оцінки

Вибір ключових властивостей для оцінки, що стануть об'єктами вимірювань і контролю під час випробувань, є відповідальним етапом, який вимагає застосування чітких критеріїв, оскільки неможливо і недоцільно оцінювати всі властивості системи одночасно. Цей вибір повинен забезпечити максимально повну і достовірну інформацію про відповідність системи вимогам за мінімальних витрат ресурсів та часу.

Першим і найважливішим критерієм є релевантність (значущість): для оцінки слід обирати лише ті властивості, які безпосередньо впливають на цільове застосування або суттєво визначають загальну цінність виробу, а також ті, що виступають в ролі жорстких обмежень (наприклад, безпека та екологічність). Властивості, які мають незначний вплив на функціонування або знаходяться у вузькому діапазоні

допустимих значень, можуть бути виключені з детальної програми випробувань.

Другий критичний критерій – вимірюваність (контрольованість): перевага надається тим властивостям, які можуть бути об'єктивно виміряні за допомогою існуючих засобів контролю та вимірювань, тобто є вимірюваними фізичними величинами, що забезпечує кількісну оцінку. Невимірювані характеристики, такі як ергономіка чи естетика, повинні бути переведені в кількісні шкали оцінок або піддані експертному контролю.

Третій критерій – чутливість: обираються властивості, які є найбільш чутливими до змін конструктивних параметрів системи або до умов зовнішнього середовища. Це дозволяє ефективно використовувати результати випробувань для коригування проектних рішень.

Четвертий критерій – вартість та складність оцінювання: при обмежених ресурсах перевага надається тим властивостям, оцінка яких є менш витратною та швидшою. Наприклад, на етапі прототипування можуть застосовуватися прискорені або форсовані випробування, що дозволяють скоротити загальні терміни досліджень, незважаючи на їхню специфічну складність.

Крім того, вибір властивостей повинен бути узгоджений зі стадією життєвого циклу системи: на етапі розробки оцінюються властивості, пов'язані з концепцією, а на етапі виробництва – технологічність і відповідність серійним зразкам. Таким чином, критерії вибору ключових властивостей є інструментом оптимізації дослідницького процесу, забезпечуючи, щоб одержання сукупної оцінки базувалося на достовірних і найбільш репрезентативних даних про систему.

Питання для самоперевірки

1. Які рівні класифікації існують для технічних систем?
2. Назвіть загальні ознаки, що характеризують технічну систему.
3. Які категорії властивостей виділяють у технічних системах?
4. Як описуються відношення між властивостями системи?
5. Який перелік необхідних властивостей технічної системи?
6. Які методи використовуються для оцінювання властивостей?
7. Як будується ієрархія властивостей у транспортних системах?
8. За якими критеріями обирають ключові властивості для оцінки?
9. Наведіть приклад конфлікту між властивостями в автомобілі.
10. Як класифікація впливає на вибір методів випробувань?

2.2.4 Тема 4. Етапи створення та використання технічних систем

1. Загальні положення про етапи створення систем

При вивченні цього пункту слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які пояснюють повний цикл існування технічної системи як послідовність взаємопов'язаних етапів від зародження ідеї до повного завершення використання. У мережі доступні освітні ресурси, де підкреслюється, що процес створення завжди багатогранний і включає організаційні, проектно-конструкторські, виробничо-технологічні та експлуатаційні рішення.

Звертати увагу на те, що етапи створення не ізольовані, а формують замкнений контур, де результати одного етапу стають входами для наступного. Під час пошуку рекомендується знайти блок-схеми, які показують загальну структуру циклу для транспортних засобів, починаючи від формулювання технічних вимог і закінчуючи утилізацією.

Важливо зрозуміти, що на початкових етапах визначається принципова можливість і доцільність створення системи, складається технічне завдання, яке враховує потреби ринку, нормативні вимоги та технічні обмеження. Для поглиблення шукати приклади з автомобілебудування, де етапи створення гібридного двигуна включали аналіз альтернативних концепцій, оцінку ризиків і попередні розрахунки.

Самостійно скласти просту схему етапів для нової моделі шасі, позначивши ключові переходи між ними та можливі зворотні зв'язки, наприклад, повернення до проектування за результатами прототипних тестів. Це дозволить побачити, що етапи створення тісно пов'язані з рівнем складності системи та кількістю планованих екземплярів. Додатково звертати увагу на пояснення, що загальні положення включають принцип ітеративності, коли процес не лінійний, а циклічний з корекціями на кожному кроці.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де ігнорування одного етапу призводило до значних витрат на пізніших стадіях. Рекомендується знайти статті про етапи розробки електромобілів, де показано, як зміна вимог до батареї вплинула на весь цикл. Для контролю розуміння скласти список загальних положень з прикладами для гусеничної техніки, враховуючи специфіку одиничного чи серійного виробництва. Такий підхід сформує системне уявлення про етапи як єдиний

процес, де кожне рішення обґрунтоване попередніми даними і спрямоване на досягнення цільових властивостей. Уникаючи детальних розрахунків, фокусуватися на логіці послідовності та взаємозалежностях, що є основою для подальшого аналізу стадій у наступних пунктах.

2. Стадії створення технічних систем різних типів виробництв

Опрацьовуючи цей пункт, необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які розрізняють стадії залежно від масштабу та типу виробництва. У відкритих джерелах шукати пояснення, що для серійного виробництва характерні чітко визначені стадії з акцентом на раціоналізацію, тоді як одиничне вимагає гнучкості та детального опрацювання концепції. Звертати увагу на те, що стадії включають підготовку, проектування, виготовлення прототипу, випробування та перехід до серії.

Під час пошуку рекомендується знайти порівняльні таблиці чи схеми для автомобілів масового та спеціального призначення, де показано відмінності в тривалості та ресурсах. Важливо зрозуміти, що тип виробництва впливає на глибину опрацювання кожної стадії: у масовому акцент на стандартизацію, в одиничному – на унікальність рішень.

Для закріплення шукати приклади стадій створення трактора серійного випуску та унікальної військової машини. Самостійно скласти порівняльну таблицю з п’ятьма стадіями для колісного та гусеничного транспорту, позначивши особливості кожної. Це допоможе побачити, як серійне виробництво прагне до механізації складання, а одиничне – до ручної доробки.

Додатково звертати увагу на пояснення впливу складності системи на кількість стадій. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де для складних систем додаються стадії моделювання чи сертифікації. Рекомендується знайти блок-схеми для різних типів, наприклад, легкового автомобіля та вантажівки. Для контролю скласти список стадій для трансмісії в серійному виробництві. Такий підхід забезпечить розуміння адаптації стадій до реальних умов.

3. Послідовність стадій створення технічної системи

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про строгу логічну послідовність від ідеї до готового виробу. У відкритих

джерелах шукати блок-схеми, які показують ланцюг стадій без пропусків. Звертати увагу на те, що послідовність починається з технічного завдання, проходить через ескізне, технічне та робоче проектування, виготовлення, випробування. Під час пошуку рекомендується знайти приклади для двигуна, де кожна стадія фіксується документацією. Важливо зрозуміти, що пропуск стадії призводить до ризиків. Самостійно намалювати послідовність для рульового механізму. Це дозволить запам'ятати порядок.

4. Розподіл стадій та операцій між виконавцями

При опрацюванні цього пункту слід шукати матеріали про командну взаємодію. У відкритих джерелах звертати увагу на розподіл між конструкторами, технологами, випробувачами. Звертати увагу на приклади, де конструктор відповідає за проектування, технолог – за виготовлення. Рекомендується знайти схеми розподілу для автомобільного заводу. Самостійно скласти матрицю ролей для шасі. Це підкреслить важливість координації.

5. Етапи використання технічної системи

При вивченні цього пункту необхідно розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які детально описують період експлуатації системи після завершення виробництва як окремий, але невід'ємний етап повного циклу.

У мережі доступні освітні ресурси, де підкреслюється, що етапи використання охоплюють транспортування до місця експлуатації, введення в дію, безпосереднє цільове застосування, технічне обслуговування, ремонт і поточний контроль стану.

Звертати увагу на те, що саме на цьому етапі виявляються реальні властивості системи, які були закладені на стадіях створення, і часто виникає потреба в доопрацюванні чи модернізації. Під час пошуку рекомендується знайти схеми чи діаграми, які показують послідовність дій під час використання автомобіля: від доставки дилеру до регулярного ТО та можливого капітального ремонту.

Важливо зрозуміти, що етапи використання тісно пов'язані з попередніми, оскільки конструктивні рішення, прийняті на етапі проектування, визначають зручність обслуговування, інтервали між перевірками та загальний ресурс. Для поглиблення шукати приклади ре-

гламентів технічного обслуговування для конкретних моделей транспортних засобів, де чітко вказано періодичність заміни масла, фільтрів, перевірки гальм і шин. Самостійно скласти просту блок-схему етапів використання для гусеничної машини, позначивши ключові операції, такі як пусконалагодження, щоденний огляд, сезонне обслуговування та діагностика. Це дозволить побачити, як етапи використання формують зворотний зв'язок для виробника у вигляді даних про відмови, зношення та експлуатаційні витрати.

Додатково звертати увагу на пояснення, що ефективність використання залежить від підготовки персоналу, наявності запасних частин і документації. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де неправильна експлуатація призводила до передчасного виходу системи з ладу, наприклад, перевантаження трансмісії чи ігнорування сигналів бортової діагностики. Рекомендується знайти статті про етапи використання електромобілів, де акцент робиться на зарядці, моніторингу батареї та програмному оновленні.

Для контролю розуміння скласти список етапів з термінами для колісного транспорту, враховуючи специфіку дорожніх умов. Такий підхід сформує розуміння використання як активної фази, де система реалізує свій потенціал і генерує інформацію для вдосконалення наступних поколінь. Уникаючи зайвої деталізації, фокусуватися на логіці переходів між операціями та їхній взаємозалежності з попередніми етапами створення.

6. Життєвий цикл системи від проектування до утилізації

Опрацьовуючи цей пункт, слід зосередитися на пошуку матеріалів, які представляють повний життєвий цикл технічної системи як безперервний ланцюг від зародження ідеї до остаточного виведення з експлуатації. У відкритих джерелах шукати блок-схеми чи кругові діаграми, які охоплюють усі фази: підготовку, проектування, виробництво, транспортування, використання, обслуговування, ремонт, модернізацію та утилізацію.

Звертати увагу на те, що життєвий цикл є замкненим, оскільки дані з утилізації можуть впливати на проектування нових систем, наприклад, через аналіз матеріалів для переробки. Під час пошуку рекомендується знайти приклади життєвого циклу автомобіля від концепту до розбирання на металобрухт, з акцентом на екологічні аспекти.

Важливо зрозуміти, що кожна фаза має свої цілі, ресурси та критерії завершення, а перехід між ними фіксується документацією. Для закріплення шукати статті про життєвий цикл гібридних транспортних засобів, де показано, як проектування враховує майбутню утилізацію батарей. Самостійно намалювати лінійну чи кругову схему життєвого циклу для двигуна внутрішнього згоряння, позначивши тривалість кожної фази та ключові події. Це допоможе візуалізувати, що цикл не закінчується продажем, а триває до повного зношення чи переробки.

Додатково звертати увагу на пояснення економічної та екологічної ефективності на кожній фазі. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де скорочення циклу за рахунок паралельного виконання фаз призводило до економії. Рекомендується знайти дані про середній життєвий цикл вантажівок. Для контролю скласти таблицю фаз з прикладами для шасі. Такий підхід забезпечить цілісне бачення системи протягом усього існування.

7. Взаємозв'язок стадій створення з випробуваннями

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про інтеграцію випробувань у процес створення. У відкритих джерелах шукати пояснення, що випробування проводяться на кожній стадії: від моделювання на етапі проектування до Acceptance tests перед серією.

Звертати увагу на те, що результати тестів коригують конструкцію. Під час пошуку рекомендується знайти схеми, де випробування показані як зворотний зв'язок. Важливо зрозуміти, що без випробувань неможливо підтвердити властивості. Самостійно скласти схему для трансмісії з позначенням тестів на стадіях. Це підкреслить наскрізний характер випробувань.

8. Особливості етапів для серійного та одиничного виробництва

При опрацюванні цього пункту слід шукати матеріали про відмінності в організації етапів залежно від обсягу випуску. У відкритих джерелах звертати увагу на те, що серійне виробництво вимагає стандартизації та автоматизації, одиничне – індивідуального підходу.

Звертати увагу на приклади, де в серії акцент на конвеєрі, в одиничному – на ручній збірці. Рекомендується знайти порівняльні схеми. Самостійно скласти таблицю особливостей для гальм. Це покаже адаптацію етапів до масштабу.

Питання для самоперевірки

1. Які загальні положення визначають етапи створення систем?
2. Назвіть стадії створення для різних типів виробництв.
3. Яка послідовність стадій створення технічної системи?
4. Як розподіляються стадії та операції між виконавцями?
5. Які етапи входять до використання технічної системи?
6. Як виглядає повний життєвий цикл системи?
7. Як стадії створення пов'язані з випробуваннями?
8. У чому особливості етапів для серійного виробництва?
9. Наведіть приклад розподілу операцій у команді розробки.
10. Як утилізація впливає на проектування системи?

2.2.5 Тема 5. Роль випробувань в процесі проектування та створення технічних систем

При вивченні цієї теми необхідно усвідомити, що випробування та експериментальні дослідження є невід'ємною і критично важливою частиною життєвого циклу будь-якої технічної системи, від моменту зародження ідеї до її утилізації. Вони виступають єдиним об'єктивним джерелом інформації про реальні властивості системи, які не можуть бути повністю передбачені лише шляхом теоретичного моделювання.

Задачі експериментальних досліджень, роль випробувань у проектуванні та створенні систем, їх інтеграція та вплив на конструктивні рішення – це ключові аспекти, що визначають успіх проекту, його безпечність, надійність та економічну доцільність. Розуміння принципів побудови систем контролю та випробувань дозволяє інженеру свідомо обирати методики, обладнання та критерії оцінки, мінімізуючи ризики та оптимізуючи процес доведення виробу до серійного виробництва.

1. Задачі експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження, у широкому розумінні, мають на меті не лише підтвердження або спростування теоретичних припущень, а й глибоке пізнання фізичної сутності процесів, що відбуваються в технічній системі та її елементах. Серед першочергових задач варто виділити верифікацію та валідацію математичних і комп'ютерних моделей, розроблених на етапі проектування.

Моделі, якими б складними вони не були, завжди є лише наближенням до реальності, і лише експеримент дає змогу оцінити їхню адекватність – тобто ступінь відповідності прогнозних характеристик реальним. Далі, однією з ключових задач є визначення фактичних значень експлуатаційних, функціональних та надійнісних показників, які неможливо точно розрахувати, наприклад, коефіцієнтів тертя, динамічних навантажень у перехідних режимах чи імовірності безвідмовної роботи протягом заданого ресурсу.

Ці вимірювання дозволяють встановити реальні межі працездатності системи. Також важливою задачею є виявлення прихованих дефектів та непередбачуваних явищ, які можуть виникнути лише при взаємодії різних підсистем в умовах наближених до реальної експлуатації. Саме експеримент часто виявляє так звані системні помилки або явища емерджентності, коли несправність виникає не через окремий елемент, а через їхню непередбачену взаємодію.

Це може включати резонансні явища, нестійкість керування чи перевищення допустимих вібраційних навантажень. Крім того, дослідження часто спрямовані на оптимізацію параметрів та вибір найкращого режиму роботи системи, що реалізується через методи планування експерименту, які дозволяють за мінімальної кількості дослідів знайти оптимальне співвідношення між різними характеристиками (наприклад, між потужністю та екологічністю). Таким чином, експеримент слугує об'єктивним містком між теорією і практикою, забезпечуючи інженера об'єктивними даними, необхідними для прийняття виважених конструктивних рішень.

2. Організація експериментальних досліджень

Ефективність експериментальних досліджень значною мірою залежить від їхньої продуманої організації, яка є комплексним процесом, що охоплює не лише технічну підготовку, а й адміністративне та методологічне планування.

Першим етапом є розробка програми та методики випробувань (ПМВ), яка повинна чітко визначати мету, об'єкт дослідження, перелік вимірюваних параметрів, допустимі похибки, послідовність проведення дослідів, а також умови їхнього проведення (навантаження, температура, тиск). ПМВ є юридичним документом, що регламентує весь процес і слугує основою для його контролю.

Другий етап – підготовка експериментальної бази, що включає

вибір або створення стендового обладнання, вимірювальних приладів та систем реєстрації даних. Особлива увага приділяється метрологічному забезпеченню – калібруванню всіх засобів вимірювання та контролю, що є критичним для достовірності отриманих результатів. Некалібрований датчик може дискредитувати весь експеримент, незалежно від його складності.

Третім, не менш важливим, аспектом є кадрове забезпечення – до проведення експериментів допускається лише кваліфікований персонал, який пройшов інструктаж з техніки безпеки та володіє навичками роботи зі специфічним обладнанням. У контексті складних технічних систем, організація також включає розробку процедур для роботи з тестовими зразками, що можуть бути дороговартісними або єдиними в своєму роді, а також створення систем для швидкого та надійного збору, обробки й архівування великих обсягів експериментальних даних. Це вимагає впровадження спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизації вимірювального процесу та оперативного аналізу результатів. Дотримання чіткої послідовності – від планування до оформлення протоколів випробувань – є запорукою того, що отримані дані будуть репрезентативними, тобто відображатимуть реальні властивості системи, а не просто артефакти експерименту.

3. Основні принципи побудови систем контролю

Системи контролю, які використовуються під час випробувань, є складними вимірювально-діагностичними комплексами, метою яких є забезпечення об'єктивної та безперервної оцінки стану технічної системи. Їхня побудова ґрунтується на низці фундаментальних принципів, які гарантують якість та достовірність отриманих даних.

Першим є принцип відповідності (адекватності): система контролю повинна бути достатньо точною, швидкою та чутливою, щоб реєструвати всі істотні параметри та динамічні процеси, що відбуваються в досліджуваній системі. Недоліки вимірювальної системи можуть призвести до спотворення результатів і, як наслідок, до хибних висновків про властивості об'єкта.

Другий принцип – мінімального впливу: засоби контролю та вимірювань не повинні суттєво змінювати режим роботи, динамічні характеристики або фізичні умови функціонування досліджуваного об'єкта. Встановлення датчиків і вимірювальних трактів має бути виконано таким чином, щоб їхня маса, жорсткість чи енергоспоживання не

вносили неприпустимих похибок у вимірювання.

Третій принцип – надійності та стійкості до перешкод: оскільки випробування часто проводяться в жорстких умовах (висока температура, вібрації, електромагнітні поля), система контролю повинна бути спроектована з урахуванням захисту від зовнішніх впливів, забезпечуючи повторюваність та відтворюваність результатів.

Четвертий принцип – комплексності та інтеграції: сучасні системи контролю є багатоканальними, вони одночасно збирають дані з багатьох точок контролю (температура, тиск, напруга, деформація), а потім ці дані синхронізуються та інтегруються в єдину картину стану системи за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє оцінювати взаємозв'язки між різними властивостями та оперативно виявляти кореляції.

Таким чином, побудова ефективної системи контролю є синтезом інженерних рішень, спрямованих на забезпечення об'єктивності вимірювань та отримання повної інформації про поведінку об'єкта в умовах випробувань.

4. Принципи систем випробувань технічних систем

Система випробувань, як організований комплекс методів, засобів та виконавців, що забезпечує перевірку якості технічної системи, підпорядковується низці фундаментальних принципів, які визначають її ефективність і достовірність.

Першим є принцип репрезентативності: умови, режими та тривалість випробувань повинні максимально точно відтворювати (або бути адекватно форсованими для прискорення процесу) реальні умови експлуатації, для яких ця система призначена.

Випробування, проведені в нерепрезентативних умовах, можуть призвести до хибних висновків про надійність або працездатність. Наприклад, випробування транспортного засобу, призначеного для використання в умовах Крайньої Півночі, мають включати спеціальні кліматичні тести.

Другий принцип – стандартизації та уніфікації: методики випробувань, критерії оцінки та процедури оформлення результатів повинні ґрунтуватися на чинних національних та міжнародних стандартах, що забезпечує порівнянність результатів, отриманих різними лабораторіями та в різний час. Це особливо критично для сертифікації продукції та її виходу на міжнародні ринки.

Третій принцип – об'єктивності та незалежності: випробування, особливо контрольні та приймальні, повинні проводитися незалежними сторонами (акредитованими лабораторіями), щоб виключити конфлікт інтересів між розробником, виробником та споживачем, тим самим гарантуючи неупередженість оцінки.

Четвертий принцип – комплексності: система випробувань має охоплювати весь вектор властивостей системи (функціональні, надійнісні, безпекові, екологічні) та всі її стадії готовності (від компонента до фінального зразка). Недопустимо перевіряти лише функціональність, ігноруючи, наприклад, надійність чи безпеку.

П'ятий принцип – економічної доцільності: програма випробувань має бути максимально оптимізована за кількістю та тривалістю дослідів, використовуючи методи планування експерименту для зниження витрат без шкоди для достовірності.

Таким чином, система випробувань є багатоетапним та багатоаспектним процесом, що слугує інструментом фінальної верифікації якості та готовності технічної системи до використання.

5. Роль випробувань у проектуванні

На етапі проектування випробування відіграють не просто допоміжну, а формуючу роль, діючи як механізм зворотного зв'язку, який коригує та направляє роботу конструкторів та інженерів. На цій стадії, коли ще не існує фінального натурного зразка, застосовуються дослідження на моделях (фізичне та математичне моделювання) та випробування критичних компонентів (агрегатів), що мають вирішальне значення для надійності та функціональності системи.

Випробування на моделях, включаючи імітаційне моделювання на комп'ютері, дозволяють швидко та з мінімальними витратами оцінити варіанти конструктивних рішень, визначити чутливість системи до змін параметрів та вибрати оптимальну структурну схему.

Цей процес дозволяє відкинути завідомо нежиттєздатні ідеї та сконцентрувати ресурси на найбільш перспективних. Крім того, ранні випробування компонентів, таких як нові матеріали, підшипникові вузли чи елементи керування, дозволяють верифікувати їхні характеристики та усунути потенційні «вузькі місця» ще до того, як вони будуть інтегровані у дорогу фінальну конструкцію.

Випробування на етапі проектування допомагають визначити допуски, межі міцності та ресурси окремих елементів, що є критичним

для розрахунку загальної надійності системи. Фактично, результати цих випробувань (наприклад, визначення реальних коефіцієнтів запасу міцності чи термінів служби) є вхідними даними для подальших проектних розрахунків.

Таким чином, випробування на етапі проектування не є пасивною перевіркою, а активним інструментом досліджень, що дозволяє інженеру приймати обґрунтовані рішення щодо конфігурації, матеріалів та технологій, запобігаючи дороговартісним змінам на пізніх стадіях створення системи.

6. Роль випробувань у створенні систем

На відміну від проектувальної ролі, де випробування є інструментом пошуку та оптимізації, на етапі створення (виготовлення) технічної системи їхня роль набуває переважно контрольно-підтверджувального характеру. Основна мета випробувань на цьому етапі – підтвердження відповідності виготовлених зразків вимогам, зафіксованим у технічній документації (ТЗ, КД), та діючим стандартам.

Це реалізується через три основні типи випробувань: попередні, приймальні та кваліфікаційні. Попередні випробування проводяться розробником з метою внутрішньої перевірки працездатності першого дослідного зразка, виявлення та усунення явних конструктивних або виробничих недоліків, які могли виникнути під час складання.

Приймальні випробування є більш формалізованими та часто проводяться за участю представників замовника чи незалежних комісій; їхня мета – засвідчити готовність зразка до серійного виробництва. Успішне проходження цих випробувань є обов'язковою умовою для підписання акта приймання.

Нарешті, кваліфікаційні випробування (або сертифікаційні) проводяться для підтвердження відповідності системи обов'язковим нормативним вимогам, насамперед щодо безпеки та екологічності, що є необхідним для отримання сертифіката відповідності та дозволу на масовий випуск.

Крім того, на етапі серійного виробництва запроваджується контроль якості (ВТК), що передбачає проведення періодичних контрольних випробувань (типових, періодичних) зразків із серійної партії, щоб гарантувати стабільність технологічного процесу та запобігти відхиленням у характеристиках, що можуть виникнути через зміни в матеріалах чи виробничих налаштуваннях. Таким чином, випробування

на етапі створення є фінальним бар'єром контролю якості, що забезпечує впевненість у тому, що готовий виріб не лише відповідає проекту, а й може безпечно та надійно функціонувати в умовах експлуатації.

7. Інтеграція випробувань у життєвий цикл

Сучасна інженерна практика вимагає, щоб випробування не були ізольованим етапом, а були інтегровані в усі фази життєвого циклу технічної системи – від проектування до утилізації. Цей підхід, відомий як моделювання на основі випробувань (Test-Driven Development) або просто інтегрований життєвий цикл, забезпечує безперервний зворотний зв'язок і постійне вдосконалення.

На стадії концептуалізації та технічного завдання випробування у формі аналізу існуючих рішень та моделювання допомагають чітко сформулювати критерії оцінки та допустимі обмеження. На етапі дослідно-конструкторських робіт (ДКР), як вже було зазначено, випробування компонентів та моделей є формуючим елементом проекту, забезпечуючи перевірку прийнятих рішень.

На стадії виробництва випробування трансформуються у контроль якості та приймальні перевірки, які гарантують відповідність серійних зразків еталонному зразку. Важливим, але часто недооціненим, етапом є експлуатаційні випробування, що проводяться вже після початку використання системи.

Ці випробування, що включають збір даних про відмови, зношення та умови використання в реальному світі, слугують основою для коригування експлуатаційної документації, вдосконалення системи технічного обслуговування (ТОіР) та, що найважливіше, генерують знання та статистику для наступних поколінь технічних систем.

Інтеграція випробувань у життєвий цикл означає, що отримані результати не просто архівуються, а активно використовуються для прогнозування надійності, оптимізації конструкції та зниження загальної вартості володіння. Такий підхід робить процес створення системи циклічним та адаптивним, що дозволяє інженерам оперативно реагувати на виклики експлуатації та постійно підвищувати технічний рівень своєї продукції.

8. Вплив результатів випробувань на конструктивні рішення

Результати випробувань є ключовим чинником, що має прямий і часто вирішальний вплив на конструктивні рішення протягом усього

процесу створення технічної системи. Кожен етап випробувань генерує дані, які або підтверджують обраний шлях, або вимагають коригування конструкції. Якщо випробування моделі або компонента на ранній стадії виявляють неприпустимо низьку надійність, то це може призвести до радикальної зміни – перепроектування вузла, вибору іншого матеріалу чи зміни принципу дії.

Такі ранні зміни, хоч і неприємні, є найбільш економічно доцільними, оскільки запобігають необхідності переробки всієї системи. Успішне проходження приймальних випробувань підтверджує доцільність конструктивних рішень та дозволяє зафіксувати конструкторську документацію для серійного виробництва.

Однак, навіть при успішних випробуваннях, отримані дані можуть призвести до оптимізаційних рішень: наприклад, якщо випробування показали надмірний запас міцності елемента, інженер може прийняти рішення про зниження його маси (за рахунок використання тонших стінок чи легших сплавів) для підвищення паливної ефективності системи.

Крім того, дані про зношування та відмови, зібрані під час тривалих надійнісних та експлуатаційних випробувань, безпосередньо впливають на розробку програм технічного обслуговування, встановлюючи періодичність заміни критичних елементів, тим самим гарантуючи безпеку та мінімізуючи ризики.

Отже, вплив результатів випробувань на конструктивні рішення є двояким: з одного боку, вони є інструментом верифікації – підтвердженням правильності попередніх рішень, а з іншого – джерелом інформації для модернізації та оптимізації, що дозволяє постійно підвищувати технічний рівень системи та її конкурентоспроможність.

Питання для самоперевірки

1. Які основні задачі експериментальних досліджень?
2. Як організовуються експериментальні дослідження?
3. Назвіть принципи побудови систем контролю.
4. Які принципи лежать в основі систем випробувань?
5. Яка роль випробувань на стадії проектування?
6. Як випробування впливають на створення систем?
7. Як інтегруються випробування у життєвий цикл?
8. Який вплив результатів випробувань на конструкцію?
9. Наведіть приклад задачі випробувань для шасі.

10. Як організація тестів залежить від типу системи?

2.2.6 Тема 6. Основні поняття та класифікація контролю і випробувань складних технічних систем

1. Випробування і контроль – основні терміни та визначення

При вивченні цього пункту слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які чітко розмежовують поняття контролю та випробувань як основних інструментів забезпечення якості технічних систем. У мережі доступні освітні ресурси, де контроль визначається як процес перевірки відповідності характеристик встановленим вимогам у конкретний момент, тоді як випробування – це комплекс дій для отримання даних про поведінку системи в заданих чи імітаційних умовах протягом певного часу.

Звертати увагу на те, що контроль може бути оперативним і швидким, наприклад, перевірка розмірів деталі, а випробування – тривалим і ресурсоємним, як стендові тести двигуна на ресурс. Під час пошуку рекомендується знайти схеми чи таблиці, які порівнюють ці терміни за метою, об’єктом, методами та результатами. Важливо зрозуміти, що обидва процеси спрямовані на виявлення відхилень, але контроль фіксує стан, а випробування оцінює динаміку.

Для поглиблення шукати приклади з автомобілебудування: контроль тиску в шинах під час складання та випробування гальм на стенді з імітацією навантажень. Самостійно скласти таблицю визначень з прикладами для трансмісії, позначивши, що контроль підтверджує відповідність нормам, а випробування – працездатність у межах ресурсу. Це дозволить уникнути плутанини в подальшому аналізі.

Додатково звертати увагу на пояснення, що терміни регулюються стандартами, де випробування включають план, програму, методику та протокол. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де неправильне розуміння термінів призводило до пропуску дефектів.

Рекомендується знайти статті про терміни в контексті транспортних систем, де контроль – це вхідний огляд матеріалів, а випробування – ходові тести. Для контролю розуміння скласти список термінів з синонімами та відмінностями для шасі. Такий підхід сформує чітке розмежування понять, необхідне для планування процесів.

2. Взаємозв'язок вимірювань, контролю та випробувань

Опрацьовуючи цей пункт, необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які показують ієрархію та взаємодію трьох процесів. У відкритих джерелах шукати схеми, де вимірювання є базою, контроль – використанням даних для порівняння з нормами, випробування – комплексним застосуванням з імітацією умов.

Звертати увагу на те, що вимірювання дає кількісні значення, контроль – рішення про прийняття чи відбракування, випробування – оцінку поведінки. Під час пошуку рекомендується знайти блок-схеми для автомобіля, де вимірювання тиску є частиною контролю, а серія вимірювань під навантаженням – випробуванням.

Важливо зрозуміти, що процеси утворюють ланцюг: без точних вимірювань неможливий контроль, без контролю – надійні випробування. Для закріплення шукати приклади з двигуном: вимірювання температури, контроль меж, випробування на перегрів. Самостійно намалювати схему взаємозв'язку для гальм. Це візуалізує потік даних.

Додатково звертати увагу на пояснення похибок на кожному рівні. У відкритих джерелах часто наводяться приклади інтеграції в діагностику. Рекомендується знайти статті про бортові системи. Для контролю скласти діаграму для трансмісії. Такий підхід забезпечить системне бачення.

3. Класифікації контролю

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про поділ контролю за різними ознаками. У відкритих джерелах шукати таблиці: за місцем – вхідний, операційний, приймальний; за методом – візуальний, інструментальний; за об'єктом – параметричний, функціональний. Звертати увагу на приклади: вхідний контроль матеріалів для кузова, операційний – під час зварювання.

Під час пошуку рекомендується знайти схеми класифікації для автомобільного виробництва. Важливо зрозуміти, що класифікація визначає інструменти та періодичність. Самостійно скласти дерево класифікації для шин. Це систематизує знання.

Додатково звертати увагу на автоматизований контроль. У відкритих джерелах часто наводяться приклади з конвеєра. Рекомендується знайти дані про статистичний контроль. Для контролю скласти список для ходової частини. Такий підхід підготує до випробувань.

4. Класифікації випробувань

При вивченні цього пункту необхідно розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які систематизують випробування за кількома ключовими ознаками для чіткого розуміння їхнього місця в процесі забезпечення якості.

У мережі доступні освітні ресурси, де випробування класифікуються за метою – дослідницькі, контрольні, сертифікаційні; за умовами – стендові, ходові (натурні), експлуатаційні; за режимами – нормальні, прискорені, форсовані; за об'єктом – елементів, підсистем, повної системи.

Звертати увагу на те, що кожна класифікаційна група має специфічні задачі: стендові дозволяють точно контролювати параметри, ходові імітують реальні дороги, експлуатаційні збирають дані в повсякденному використанні. Під час пошуку рекомендується знайти порівняльні таблиці чи блок-схеми, які показують відмінності між видами на прикладі автомобіля: стендові тести двигуна на потужність, ходові – на маневреність, експлуатаційні – на ресурс у парку.

Важливо зрозуміти, що класифікація визначає планування, обладнання, методику та обсяг вибірки. Для поглиблення шукати приклади прискорених випробувань трансмісії з використанням підвищених навантажень для скорочення часу оцінки довговічності. Самостійно скласти дерево класифікації з чотирма основними гілками та підгрупами для гальмівної системи, позначивши для кожного виду мету, умови, тривалість і тип результатів.

Це дозволить візуалізувати, як один об'єкт може проходити кілька видів випробувань на різних етапах. Додатково звертати увагу на пояснення, що класифікація за метою пов'язана з життєвим циклом: дослідницькі – на стадії НДДКР, контрольні – при виробництві, сертифікаційні – перед виходом на ринок.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де неправильний вибір виду призводив до недооцінки ризиків, наприклад, стендові тести без ходових не виявляли вібрацій на нерівностях. Рекомендується знайти статті про комбіновані випробування для електромобілів, де поєднуються стендові цикли зарядки з ходовими на різних покриттях.

Для контролю розуміння скласти матрицю класифікацій з прикладами для ходової частини, враховуючи специфіку колісних і гусе-

ничних машин. Такий підхід сформує системне уявлення про випробування як багатогранний інструмент, необхідний для обґрунтування рішень на всіх етапах створення та використання.

5. Загальна схема експериментальних досліджень

Опрацьовуючи цей пункт, слід зосередитися на пошуку матеріалів, які представляють універсальну послідовність дій при проведенні експерименту для будь-якої технічної системи. У відкритих джерелах шукати блок-схеми, де схема включає формулювання задачі, планування, підготовку, виконання, реєстрацію даних, обробку, аналіз і висновки. Звертати увагу на те, що схема є циклічною з можливими ітераціями: результати одного етапу можуть вимагати коригування плану.

Під час пошуку рекомендується знайти приклади схем для дослідження стійкості автомобіля на повороті, де показано вибір об’єкта, умов, обладнання та статистичної обробки. Важливо зрозуміти, що схема забезпечує відтворюваність і обґрунтованість результатів. Для закріплення шукати статті про експерименти з двигуном, де деталізовано етапи від гіпотези до протоколу.

Самостійно намалювати загальну схему з вісьмома блоками для оцінки зношення шин, позначивши стрілки зворотного зв’язку. Це допоможе запам’ятати послідовність. Додатково звертати увагу на пояснення ризиків на кожному етапі, наприклад, неправильний вибір умов.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади польових досліджень. Рекомендується знайти схеми для гусеничної техніки. Для контролю скласти покроковий план для трансмісії. Такий підхід забезпечить практичні навички планування.

6. Класифікація відмов складних технічих систем

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про поділ відмов за причинами, наслідками та характером. У відкритих джерелах шукати таблиці: за походженням – конструктивні, виробничі, експлуатаційні; за наслідками – критичні, значні, незначні; за характером – раптові, поступові. Звертати увагу на приклади: конструктивна відмова поршня через помилку в розрахунках, експлуатаційна – через перевантаження. Під час пошуку рекомендується знайти схеми для двигуна.

Важливо зрозуміти, що класифікація потрібна для планування тестів. Самостійно скласти дерево для гальм. Це систематизує знання. Додатково звертати увагу на статистичні дані. У відкритих джерелах

часто наводяться приклади аналізу відмов. Рекомендується знайти дані для автомобілів. Для контролю скласти список для шасі. Такий підхід підготує до дефектів.

7. Класифікація дефектів технічних систем

При вивченні цього пункту необхідно розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які розмежовують дефекти від відмов і систематизують їх за походженням, виявленням та впливом на систему. У мережі доступні освітні ресурси, де дефект визначається як відхилення від норми в конструкції, матеріалі чи виконанні, яке може призвести до відмови, але не завжди її викликає негайно.

Звертати увагу на класифікацію за етапом виникнення – проектні (помилки в кресленнях), технологічні (порушення режимів зварювання), матеріальні (раковини в литті), монтажні (неправильне кріплення); за характером – явні (виявляються візуально), приховані (потрібні інструменти); за наслідками – критичні (небезпека), суттєві (зниження ресурсу), несуттєві (косметичні).

Під час пошуку рекомендується знайти порівняльні таблиці чи діаграми для автомобільних компонентів, наприклад, дефекти кузова від корозії чи тріщини в блоці циліндрів. Важливо зрозуміти, що класифікація дефектів є основою для вибору методів контролю та випробувань, оскільки приховані дефекти вимагають неруйнівного контролю, а критичні – обов’язкового відбракування. Для поглиблення шукати приклади аналізу дефектів у трансмісії, де технологічний дефект шестерні призводив до поступового зношення.

Самостійно скласти ієрархічну схему класифікації з трьома рівнями для гальмівних дисків, позначивши для кожного типу методи виявлення та можливі наслідки. Це дозволить побачити зв’язок між дефектом і ризиком відмови. Додатково звертати увагу на пояснення, що дефекти часто накопичуються, перетворюючись на відмову під впливом навантажень.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади статистики дефектів на конвеєрі, де 80 % виявляються на етапі контролю. Рекомендується знайти статті про дефекти в електронних блоках керування, де приховані помилки в пайці проявлялися лише в експлуатації. Для контролю розуміння скласти матрицю дефектів з прикладами для ходової

частини колісних і гусеничних машин, враховуючи специфіку матеріалів. Такий підхід сформує навички раннього виявлення проблем і підготує до планування випробувань, де дефекти є об’єктом пошуку.

8. Зв’язок класифікації з плануванням випробувань

Опрацьовуючи цей пункт, слід зосередитися на пошуку матеріалів, які демонструють, як класифікація відмов і дефектів визначає структуру, обсяг і методику випробувань. У відкритих джерелах шукати схеми, де на основі типів відмов обирається вид тесту: для раптових – прискорені, для поступових – ресурсні.

Звертати увагу на те, що класифікація дефектів вказує на необхідність конкретних методів контролю в плані випробувань. Під час пошуку рекомендується знайти приклади планів для двигуна, де критичні дефекти перевіряються неруйнівним контролем на кожному етапі. Важливо зрозуміти, що план випробувань будується з урахуванням ймовірності та наслідків кожного класу.

Для закріплення шукати статті про планування ходових випробувань з фокусом на експлуатаційні відмови. Самостійно скласти таблицю зв’язку: тип відмови/дефекту – вид випробування – мета – обладнання для трансмісії. Це візуалізує логіку. Додатково звертати увагу на статистичні аспекти планування.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де ігнорування класифікації призводило до пропуску дефектів. Рекомендується знайти плани сертифікаційних тестів. Для контролю скласти план для шасі на основі класифікації. Такий підхід забезпечить обґрунтоване планування.

Питання для самоперевірки

1. Які основні терміни визначають випробування та контроль?
2. Як пов'язані вимірювання, контроль і випробування?
3. Назвіть класифікації контролю.
4. Які існують класифікації випробувань?
5. Як виглядає загальна схема експериментальних досліджень?
6. Які типи відмов бувають у складних системах?
7. Як класифікуються дефекти технічних систем?
8. Як класифікація впливає на планування випробувань?
9. Наведіть приклад взаємозв'язку вимірювань і контролю.
10. Яка різниця між раптовими та поступовими відмовами?

2.2.7 Тема 7. Дослідження складних технічних систем з використанням моделей

При вивченні цієї теми необхідно наголосити, що моделювання є одним із найбільш потужних та економічно ефективних інструментів системного аналізу та дослідження складних технічних систем. У сучасній інженерії часто неможливо або недоцільно досліджувати реальний об'єкт через його велику вартість, розміри, небезпеку експерименту чи значні часові витрати.

У таких випадках на допомогу приходять моделі – спрощені аналоги, що відображають ключові властивості оригіналу, які є об'єктом інтересу. Важливо розуміти мету та задачі моделювання, диференціювати фізичне та математичне моделювання і усвідомлювати їхні переваги та недоліки.

Грамотне використання моделей дозволяє інженерам прогнозувати поведінку системи, оптимізувати її параметри та приймати обґрунтовані конструктивні рішення ще до створення дорогого натурного зразка, що є критичним для транспортних систем та інших високотехнологічних об'єктів.

1. Мета моделювання при створенні складних систем

Основною метою моделювання при створенні складних технічних систем є зниження невизначеності та ризиків, притаманних процесу розробки, шляхом отримання достовірної інформації про поведінку майбутнього об'єкта. Складні системи характеризуються великою кількістю елементів, нелінійними взаємозв'язками та впливом численних зовнішніх факторів, що робить їхню поведінку складною для інтуїтивного передбачення та чисто аналітичного розрахунку.

Моделювання дозволяє систематизувати знання про об'єкт і представити їх у формі, зручній для аналізу та експерименту. На ранніх стадіях життєвого циклу, коли ще не існує фізичного прототипу, моделювання є єдиним способом оцінити життєздатність різних концепцій, провести багатоваріантний пошук оптимальних рішень і вибрати найбільш перспективну структурну схему.

Це забезпечує економічну ефективність, оскільки виправлення помилок на етапі моделювання (наприклад, зміна рядка коду або креслення) набагато дешевше, ніж на етапі натурних випробувань (пере-

робка готового виробу). Крім того, моделювання дозволяє досліджувати граничні та аварійні режими роботи системи (наприклад, критичні навантаження, зіткнення, відмови), які є надто небезпечними, дорогими або неможливими для відтворення в натурному експерименті. Таким чином, модель виступає як «лабораторія» для інженерного мислення, де можна швидко, безпечно та з мінімальними витратами перевірити гіпотези, що забезпечує перехід від загальних теоретичних відносин до конкретних кількісних залежностей, необхідних для створення надійної та ефективної системи.

2. Задачі моделювання в дослідженнях

Моделювання у сфері дослідження складних технічних систем вирішує цілу низку конкретних задач, які спрямовані на глибоке розуміння та оптимізацію характеристик об'єкта. Одна з головних задач – прогнозування динамічної та статичної поведінки системи в різних умовах експлуатації, що включає оцінку швидкості реакції на вхідні сигнали, стабільності руху, вібраційних характеристик чи розподілу навантажень. Моделі дозволяють визначити невідомі параметри, які неможливо виміряти безпосередньо в натурі (наприклад, температуру всередині конструктивних елементів або точні значення коефіцієнтів демпфування).

Іншою важливою задачею є оптимізація конструктивних та керуючих параметрів: моделювання дозволяє ітеративно перебирати тисячі комбінацій параметрів (маса, жорсткість, налаштування регуляторів) для досягнення найкращих функціональних, надійнісних або економічних показників. Це критично важливо, оскільки в реальній системі такий перебір був би неможливим через час і вартість.

Крім того, моделювання використовується для аналізу чутливості – визначення того, як зміна окремого вхідного параметра (наприклад, якості матеріалу або точності виготовлення) впливає на ключові вихідні характеристики системи. Це допомагає ідентифікувати критичні елементи, які потребують особливо жорсткого контролю якості та більш ретельних випробувань. Нарешті, моделі є основою для розробки та тестування алгоритмів керування та діагностики, що особливо актуально для сучасних систем з високим рівнем автоматизації.

Завдяки моделюванню можна «натренувати» систему керування в безпечному віртуальному середовищі, що значно прискорює процес

її доведення. Таким чином, моделювання є універсальним інструментом, що забезпечує перевірку гіпотез, кількісну оцінку, оптимізацію та підготовку до натурних випробувань.

3. Загальні відомості про випробування з моделями

Випробування з використанням моделей, або модельний експеримент, є методологією, що дозволяє замінити дослідження дорогого, великого або небезпечного оригіналу дослідженням його меншого, дешевшого або віртуального аналога. Основна ідея полягає у дотриманні принципів подібності – гарантії того, що поведінка моделі адекватно відображає поведінку оригіналу.

Принцип подібності вимагає не лише геометричної подібності (збереження пропорцій), але й фізичної подібності (дотримання одних і тих самих законів природи) та кінематичної подібності (схожість у русі). Це досягається через використання критеріїв подібності (наприклад, числа Рейнольдса, Фруда, Струхаля), які є безрозмірними величинами, що залишаються однаковими як для моделі, так і для натурного об'єкта. Залежно від типу моделі, випробування можуть бути двох основних видів: фізичний експеримент з масштабними моделями (наприклад, продування зменшеної моделі літака в аеродинамічній трубі) або віртуальний експеримент з математичними моделями (комп'ютерне моделювання міцності чи динаміки).

Ключовим етапом будь-якого модельного експерименту є валідація – порівняння результатів, отриманих на моделі, з обмеженими натурними даними або відомими теоретичними залежностями. Валідація підтверджує, що модель адекватна поставленій задачі.

Після отримання результатів на моделі, вони мають бути масштабовані для отримання прогнозних характеристик натурного об'єкта, що вимагає застосування формул перерахунку на основі критеріїв подібності. Таким чином, випробування з моделями є систематизованим процесом, що дозволяє інженеру отримати обґрунтовані кількісні дані про об'єкт, який ще не існує або недоступний для прямого дослідження.

4. Випробування на основі фізичного моделювання

Фізичне моделювання передбачає створення матеріального, часто зменшеного, аналога технічної системи (моделі), на якому проводяться реальні фізичні експерименти. Цей підхід є особливо цінним для

дослідження процесів, які погано піддаються або є надзвичайно складними для точного математичного опису, наприклад, турбулентні потоки рідини та газу, хвильові процеси, деформації ґрунтів або крихке руйнування матеріалів.

Головний принцип фізичного моделювання – геометрична, кінематична та динамічна подібність між моделлю та оригіналом, що досягається шляхом забезпечення рівності критеріїв подібності. Наприклад, при дослідженні гідротехнічних споруд у зменшеному масштабі (наприклад, модель річкової греблі), критичним є дотримання числа Фруда для правильного відтворення гравітаційних сил та швидкості течії. Випробування на основі фізичного моделювання можуть бути різних типів: від моделювання в натуральному масштабі (наприклад, на спеціальних стендах для випробування міцності конструкцій) до використання масштабованих моделей у лабораторних умовах (наприклад, аеродинамічна труба або гідролоток).

Перевага цього методу полягає в його наочності та високій достовірності для певних фізичних явищ, оскільки модель підпорядковується тим же законам фізики, що і оригінал. Однак, фізичне моделювання має суттєві обмеження, включаючи високу вартість створення точної моделі, складність забезпечення абсолютної подібності для всіх процесів одночасно (так звані «масштабні ефекти») та труднощі з перерахунком результатів на натуру, якщо не всі критерії подібності були виконані ідеально. Попри розвиток комп'ютерних технологій, фізичне моделювання залишається незамінним для валідації складних математичних моделей і дослідження унікальних природних явищ.

5. Випробування на основі математичного моделювання

Математичне моделювання є домінуючим методом дослідження складних технічних систем на етапах проектування та оптимізації. Воно ґрунтується на описі функціонування системи за допомогою математичних рівнянь, функціоналів та логічних залежностей, які відображають фізичні закони та взаємозв'язки між елементами. Фактично, створюється віртуальний аналог системи у вигляді програмного коду.

Найпоширенішими інструментами є методи кінцевих елементів (FEM) для аналізу міцності, жорсткості та теплових полів, а також обчислювальна гідродинаміка (CFD) для моделювання потоків. Випробування на основі математичного моделювання полягають у чисельному

вирішенні цих рівнянь за допомогою комп'ютерних програм при заданих початкових та граничних умовах. Це дозволяє інженеру швидко і багаторазово змінювати параметри моделі (наприклад, товщину стінки, матеріал, налаштування керування) та спостерігати, як це впливає на вихідні характеристики, що є ідеальним для оптимізації конструкції.

До ключових переваг цього методу відносяться низька вартість (після придбання ПЗ), висока швидкість проведення віртуальних експериментів, можливість дослідження небезпечних та недосяжних режимів та легкість автоматизації багатоваріантного пошуку.

Водночас, головним недоліком є питання адекватності моделі: точність результатів повністю залежить від коректності початкових припущень, точності вхідних даних (наприклад, властивостей матеріалів) та точності чисельного методу. Невірна модель може дати точні числа, які не мають жодного відношення до реальності. Тому валідація математичних моделей за допомогою обмежених натурних або фізичних випробувань є обов'язковою умовою для їхнього практичного застосування.

6. Імітаційне моделювання складних систем

Імітаційне моделювання (або імітаційне моделювання подій/процесів) є специфічним типом математичного моделювання, яке зосереджене не стільки на фізичних законах, що описують елемент, скільки на логіці взаємодії численних елементів та підсистем, особливо коли в системі присутні випадкові події та необхідність обробки великих потоків інформації або ресурсів.

Цей метод ідеально підходить для дослідження організаційних, логістичних, транспортних та виробничих систем, де ключовими є часові характеристики, пропускна здатність, черги та імовірнісні процеси.

У контексті складних технічних систем, імітаційне моделювання використовується для:

1) оцінки надійності та ремонтопридатності (моделювання послідовності відмов, відновлень та їхнього впливу на загальну працездатність);

2) аналізу логістики та технічного обслуговування (визначення оптимальної кількості запчастин, персоналу та часу простою);

3) моделювання транспортних потоків та керування (оптимізація графіків руху, диспетчерських рішень).

На відміну від класичного аналітичного моделювання, імітаційна модель не видає розв'язку у вигляді формули, а програє (імітує) процес функціонування системи протягом тривалого часу, фіксуючи статистичні дані про події. Завдяки цьому можна оцінити імовірнісні показники, як-от середній час простою, ймовірність затримки або загальний ресурс до відмови.

Це особливо важливо для складних систем, де аналітичні методи занадто громіздкі. Результати імітаційного моделювання є статистичними, що вимагає проведення серії «прогонів» моделі для забезпечення достовірності результатів, але цей метод надає унікальну можливість оцінити системні ефекти та складність відносин, що виникають при взаємодії багатьох випадкових факторів.

7. Переваги та недоліки різних типів моделювання

Кожен тип моделювання (фізичне, математичне, імітаційне) має свій діапазон застосування та унікальний набір переваг і недоліків. Фізичне моделювання вигідно вирізняється високою достовірністю для конкретних фізичних явищ і є незамінним для валідації математичних моделей. Його ключові недоліки: висока вартість створення моделі та проведення експериментів, складність забезпечення повної подібності для всіх процесів одночасно (масштабні ефекти) та довга тривалість самого експерименту.

Математичне моделювання (включаючи FEM та CFD) надає величезні переваги у швидкості, вартості та можливості багатоваріантної оптимізації. Воно дозволяє швидко змінювати параметри та досліджувати небезпечні режими, що є його сильною стороною. Однак його головний недолік – залежність від адекватності початкових рівнянь та вхідних даних. Якщо фізичний процес описано неточно, то й результати будуть невірними, незалежно від потужності комп'ютера.

Імітаційне моделювання є найкращим інструментом для аналізу логіки взаємодії, випадкових подій та оцінки надійності складних систем, оскільки дозволяє працювати з імовірнісними характеристиками та часовими потоками.

Його недоліки включають складність побудови самої імітаційної моделі (вимагає глибокого розуміння логіки системи) та те, що результати є статистичними, вимагаючи багаторазових прогонів і не надаючи простих аналітичних залежностей. Зрештою, в дослідженні складних

технічних систем перевага надається комплексному підходу – інтеграції всіх трьох типів моделювання. Наприклад, математичне моделювання використовується для швидкої оптимізації; фізичне – для валідації критичних зон; а імітаційне – для оцінки експлуатаційної надійності.

8. Застосування моделювання в транспортних системах

Транспортні системи (авіація, залізничний, автомобільний та водний транспорт) є однією з найскладніших галузей для інженерного моделювання, де використовуються всі описані вище методи для забезпечення безпеки, надійності та ефективності.

Математичне моделювання є основою для динамічного аналізу – моделювання руху транспортного засобу (ТЗ) як багатомасової системи (наприклад, віртуальне моделювання крену літака, стійкості вагона чи керованості автомобіля). Використовуються методи FEM для оптимізації конструкцій кузовів та рам за критеріями міцності та маси, а CFD – для аеродинамічного опору та охолодження двигунів, що критично впливає на паливну економічність.

Фізичне моделювання залишається незамінним для:

1) аеродинамічних випробувань зменшених моделей літаків та автомобілів у трубах для точного визначення сил опору;

2) краш-тестів (імітації зіткнень) на спеціальних стендах, що є життєво важливим для оцінки пасивної безпеки та верифікації комп'ютерних моделей зіткнень;

3) гідродинамічних випробувань моделей кораблів у басейнах.

Імітаційне моделювання знаходить широке застосування в:

1) оцінці надійності критичних агрегатів (двигун, трансмісія) та прогнозуванні їхнього ресурсу;

2) аналізі транспортних потоків та логістики (моделювання роботи вокзалів, портів, залізничних ділянок для оптимізації пропускної здатності);

3) розробці тренажерів для екіпажів – віртуальне середовище, що дозволяє відпрацьовувати складні та аварійні ситуації без ризику.

Комплексне застосування цих методів дозволяє ще на стадії проектування точно прогнозувати експлуатаційні властивості ТЗ, мінімізувати необхідний обсяг дорогих натурних випробувань на полігонах та гарантувати, що фінальний продукт відповідає

найжорсткішим вимогам міжнародних стандартів, особливо щодо безпеки та екологічності.

Питання для самоперевірки

1. Яка мета моделювання при створенні систем?
2. Назвіть основні задачі моделювання.
3. Що включають випробування з використанням моделей?
4. У чому суть фізичного моделювання?
5. Як проводиться математичне моделювання?
6. Що таке імітаційне моделювання?
7. Які переваги та недоліки фізичного моделювання?
8. Де застосовується моделювання в транспортних системах?
9. Наведіть приклад математичної моделі двигуна.
10. Як забезпечити адекватність імітаційної моделі?

Змістовий модуль 2. Методологія експериментальних досліджень, випробувань та сертифікації

2.2.8 Тема 8. Експериментальні дослідження складних технічних систем

1. Загальні відомості про експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження являють собою фундаментальний метод наукового пізнання, спрямований не лише на констатацію фактів, але й на активне втручання в досліджуваний процес з метою виявлення причинно-наслідкових зв'язків.

На відміну від пасивного спостереження, експеримент дозволяє ізолювати досліджувані явища від сторонніх впливів, створювати контрольовані умови та багаторазово відтворювати процеси для отримання статистично валідних даних.

У контексті складних технічних систем, таких як автомобілі, сільськогосподарська або будівельна техніка, експериментальні дослідження виходять за рамки простих випробувань на працездатність. Вони трансформуються в складний багатоетапний процес, основним завданням якого є не просто оцінка поточного стану системи, а глибинне вивчення фізичних процесів, що протікають під час її функціонування. Це включає аналіз взаємодії різних підсистем, вияв-

лення резонансних явищ, оцінку втомної міцності матеріалів у реальних умовах навантаження та дослідження динаміки зношування критичних вузлів.

Особливістю таких досліджень є їхня орієнтація на майбутнє – отримані дані лягають в основу прогностичних моделей, дозволяють оптимізувати конструкцію на ранніх етапах проектування та розробляти превентивні стратегії технічного обслуговування, що в кінцевому підсумку суттєво підвищує життєвий цикл і економічну ефективність технічної системи.

2. Планування експериментальних досліджень

Планування експерименту є критично важливим етапом, що визначає наукову цінність і практичну корисність усієї подальшої роботи. Це не просто складання переліку послідовних дій, а комплексний процес, що базується на принципах математичної статистики та системного підходу. Ключовим поняттям тут є факторний простір – абстрактна область, що визначається сукупністю всіх вхідних параметрів (факторів), які можуть впливати на вихідні характеристики системи.

До таких факторів можуть належати швидкість руху, величина навантаження, температура навколишнього середовища, характеристики паливно-мастильних матеріалів, режими навантаження тощо. Завдання дослідника полягає у тому, щоб, виходячи з мети дослідження, визначити обмежений набір найбільш впливових факторів і розробити таку матрицю експерименту, яка дозволить при мінімальній кількості дослідів отримати максимально повну інформацію про поведінку системи в усьому діапазоні змін цих факторів.

Використання методів математичного планування експерименту, таких як повний або дробовий факторний експеримент, плани Бокса-Вілсона чи латинські квадрати, дозволяє не тільки оптимізувати витрати ресурсів, але й отримати математичну модель об'єкта, що адекватно описує його реакцію на зовнішні впливи. Таким чином, грамотне планування перетворює експеримент з набору випробувань у потужний інструмент наукового дослідження та інженерного аналізу.

3. Проведення експериментальних досліджень

Безпосереднє проведення експерименту – це фаза реалізації розробленого плану, що вимагає високої організації, точності та неухиль-

ного дотримання протоколу. На цьому етапі теоретичні наміри втілюються в практичні дії, а від якості їх виконання безпосередньо залежить достовірність отриманих результатів. Процес починається з підготовки об'єкта дослідження – технічної системи, яка повинна бути приведена в стан, що відповідає технічним умовам, з проведеним необхідним обслуговуванням та калібруванням вбудованих систем контролю.

Далі відбувається розгортання вимірювального комплексу, який включає встановлення первинних датчиків (тензометри, акселерометри, термопари, датчики тиску тощо), підсилювачів сигналів, аналого-цифрових перетворювачів та систем реєстрації даних. Критично важливо забезпечити синхронізацію всіх каналів вимірювання, щоб подальша обробка даних дозволяла аналізувати причинно-наслідкові зв'язки між різними параметрами.

Під час проведення дослідних циклів оператор або автоматизована система управління забезпечують точне відтворення заданих планом режимів навантаження та умов. При цьому ведеться суворий протокол, де фіксуються не тільки вимірювані параметри, але й будь-які зовнішні обставини, що могли вплинути на хід експерименту – коливання напруги живлення, зміни температури в лабораторії, нештатні ситуації. Така скрупульозність забезпечує відтворюваність експерименту та дозволяє у разі необхідності виявити і виключити артефакти з отриманих даних.

4. Етапи підготовки до експерименту

Підготовча фаза є основою усього майбутнього експерименту і включає низку послідовних та взаємопов'язаних дій. Першим кроком завжди є чітке формулювання мети дослідження, яка визначає всі наступні рішення. Наприклад, метою може бути визначення впливу жорсткості підвіски на курсову стійкість автомобіля при русі з високою швидкістю. Виходячи з мети, формулюються конкретні завдання та гіпотези, які підлягають перевірці.

Наступним кроком є проведення патентних досліджень згідно з вимогами ГОСТ 33575-97, що дозволяє визначити світовий рівень розвитку техніки в даній галузі, уникнути повторення вже відомих рішень та виявити потенційні напрямки для інновацій. Паралельно проводиться аналіз існуючої науково-технічної літератури та попередніх звітів про випробування подібних систем. Це дозволяє сформувати теоретичну базу, визначити діапазони змін факторів, що цікавлять, і

оцінити очікувані ефекти. Далі розробляється детальна програма та методика експерименту – документ, що регламентує всі аспекти проведення робіт: від вимог до об'єкта дослідження та вимірювальної апаратури до алгоритмів обробки даних.

Особливу увагу приділяють вибору та підготовці вимірювального обладнання: його метрологічні характеристики (точність, чутливість, діапазон) повинні відповідати поставленим завданням, а всі засоби вимірювань мають пройти обов'язкову калібрування з дотриманням звітності про прослідковуваність до державних еталонів.

5. Вибір об’єкта та умов дослідження

Вибір конкретного об'єкта дослідження та моделювання умов його експлуації є вирішальним фактором для екологічної валідності отриманих результатів. Об'єктом може виступати як повнокомплектна машина (наприклад, новий прототип автомобіля), так і її окремий вузол (двигун, коробка передач, гальмівна система), або навіть матеріал, з якого виготовлена критична деталь.

Критеріями вибору слугують репрезентативність об'єкта для всієї популяції подібних систем, його технічний стан та відповідність вимогам нормативної документації. Ще складнішою задачею є моделювання експлуатаційних умов у лабораторних або полігонних умовах.

Для цього необхідно провести ретельний аналіт реальних умов експлуатації системи, виокремивши найбільш характерні та найбільш жорсткі режими навантаження. Наприклад, для автомобіля це можуть бути режими міської їзди з частими розгонами та гальмуванням, рух по бездоріжжю, тривалий рух із максимальною швидкістю по автомагістралі. Завдання експериментатора полягає у тому, щоб розробити імітаційні цикли, які б відтворювали ці умови з достатньою точністю, але в стислі терміни. Часто для цього використовуються методи прискорених випробувань, коли інтенсивність впливів штучно підвищується, але з дотриманням принципу подібності механізмів руйнування та зношування, щоб отримані результати можна було екстраполювати на реальний термін служби.

6. Методи фіксації та реєстрації даних

Сучасні експериментальні дослідження характеризуються надзвичайно великими обсягами даних, що реєструються з високою частотою дискретизації, що робить якісну фіксацію інформації однією з

ключових ланок усього процесу. Вимірювальні канали формуються на основі первинних датчиків, які перетворюють фізичні величини (деформацію, прискорення, температуру, тиск) в електричні сигнали.

Ці сигнали, як правило, слабкі та заважені, тому вони піддаються попередній обробці в підсилювачах та фільтрах, що входять до складу пристроїв нормалізації. Сучасним трендом є використання інтегрованих структур «датчик-пристрій нормалізації», які виконуються у вигляді єдиного мікрокристала і забезпечують високу стабільність та завадостійкість вихідного сигналу. Останнім ланкою є системи реєстрації, які здійснюють аналого-цифрове перетворення та зберігання даних.

Це можуть бути як спеціалізовані бортові системи з автономним живленням і пам'яттю, що встановлюються безпосередньо на об'єкт, що випробовується, так і стаціонарні комп'ютерні комплекси, що працюють в реальному часі.

Крім автоматизованої реєстрації, важливу роль відіграє візуальне спостереження та фіксація на відео, особливо при випробуваннях на динамічну безпеку або при вивченні перехідних процесів, де необхідно корелювати показання датчиків із візуальною картиною поведінки об'єкта. Всі дані повинні зберігатися в структурованому вигляді з обов'язковим метуванням (часовими мітками), що забезпечує їхню придатність для подальшої математичної та статистичної обробки.

7. Ризики та заходи безпеки під час експерименту

Проведення експериментальних досліджень, особливо на складних і потужних технічних системах, нерідко супроводжується значними ризиками для персоналу, обладнання та навколишнього середовища. Умовно ризики можна поділити на кілька категорій: механічні (руйнування вузлів, розліт уламків, зрив деталей з кріплень), енергетичні (викиди палива, розрив гідравлічних або пневматичних магістралей, короткі замикання), динамічні (перекидання, неконтрольований рух об'єкта) та теплові (пожежі, опіки).

Мінімізація цих ризиків починається ще на етапі проектування експерименту шляхом введення обмежувальних параметрів і розробки послідовності дій, що виключає небезпечні режими. Обов'язковим є проведення інструктажу всіх учасників робіт з детальним роз'ясненням можливих небезпек та алгоритмів дій у разі нештатної ситуації.

Безпосередньо в зоні проведення випробувань встановлюються інженерні засоби захисту: захисні кожухи на обертових елементах,

страхувальні троси для уникнення перекидання (як показано на рис. 2.8 документа), аварійні системи зупинки («гальмівні лінії»), протипожежні системи, а також чітко позначені безпечні зони для спостереження.

Особливу увагу слід приділити випробуванням, пов'язаним із вимірюванням токсичних викидів або шуму, де необхідно забезпечити засоби індивідуального захисту працівників. Наявність детального плану ліквідації аварійних ситуацій та проведення тренувань з його відпрацювання є обов'язковим компонентом відповідального підходу до організації експериментальних досліджень.

8. Аналіз попередніх результатів для планування

Жодне експериментальне дослідження не починається з чистого аркуша; воно завжди є продовженням або розвитком попередніх робіт. Тому критично важливим етапом підготовки є ретельний аналіз вже наявних даних. Це стосується як результатів власних попередніх експериментів, так і даних, опублікованих у науковій літературі, звітах про випробування або навіть у технічній документації суперників (у рамках проведеного патентного пошуку).

Аналіз таких даних дозволяє сформувати обґрунтовані гіпотези, уникнути дублювання робіт і виявити «білі плями» у знаннях, на які і має бути спрямований новий експеримент. Наприклад, якщо дані попередніх ресурсних випробувань вказують на концентрацію втомних тріщин у певній зоні рами, це прямо вказує на необхідність більш детального дослідження напружено-деформованого стану саме в цій зоні з використанням тензометрії.

Крім того, статистична обробка історичних даних про відмови дозволяє визначити найбільш «слабкі ланки» системи та сконцентрувати зусилля на підвищенні їхньої надійності. Часто аналіз попередніх результатів призводить до корегування методики: зміни діапазону факторів, впровадження нових, більш точних методів вимірювання або зменшення обсягу вибірки за рахунок більш ефективного плану експерименту.

Таким чином, консолідація та критичне осмислення всього масиву наявної інформації є запорукою того, що новий експеримент буде не просто черговим випробуванням, а цілеспрямованим і ефективним інструментом отримання нових знань.

Питання для самоперевірки

1. У чому суть експериментальних досліджень?
2. Як здійснюється планування експерименту?
3. Які етапи включає проведення дослідження?
4. Як вибрати об’єкт і умови експерименту?
5. Які методи фіксації даних застосовуються?
6. Які ризики виникають під час експерименту?
7. Як забезпечити безпеку при проведенні досліджень?
8. Як попередні результати впливають на планування?
9. Наведіть приклад плану дослідження двигуна.
10. Яка роль статистики в плануванні експерименту?

2.2.9 Тема 9. Випробування складних технічних систем

1. Загальні відомості про випробування

Випробування складних технічних систем є обов'язковою та невід'ємною ланкою всього життєвого циклу виробу – від перших ескізів до утилізації. Якщо експериментальні дослідження зосереджені на вивченні фундаментальних фізичних процесів і пошуку нових знань, то випробування мають суто прикладну, оціночно-контрольну функцію. Їхня головна мета – отримати в нормованих і керованих умовах об'єктивну та документально підтверджену інформацію про фактичні значення показників якості, надійності та безпеки продукції.

Ця інформація служить основою для прийняття ключових управлінських рішень: про готовність конструкції до серійного виробництва, про відповідність вимогам технічних регламентів, про можливість подальшої експлуатації або про необхідність конструктивних доробок.

Система випробувань будується як сукупність різноманітних заходів, що охоплюють усі етапи – від розробки та виробництва до експлуатації. Вона включає дослідницькі випробування, спрямовані на збір даних для вдосконалення прототипу; контрольні, що перевіряють відповідність вимогам технічного завдання; кваліфікаційні, що оцінюють готовність до запуску в серію; та приймальні, за результатами яких вирішується питання про приймання партії виробу.

Таким чином, випробування виступають основним механізмом зворотного зв'язку, який дозволяє інженерам і керівництву підприємства контролювати і підтверджувати якість створюваної техніки,

мінімізуючи ризики випуску дефектної продукції та забезпечуючи її конкурентоспроможність на ринку.

2. Види випробувань: стендові

Стендові випробування займають особливе місце в арсеналі методів дослідження технічних систем, оскільки вони забезпечують найвищий рівень контролю та відтворюваності умов. Їхня сутність полягає в тому, що об'єкт випробувань (яким може бути як повнокомплектна машина, так і окремий її вузол – двигун, коробка передач, гальмівний механізм) встановлюється на спеціалізованому обладнанні – стенді, що дозволяє з високою точністю моделювати різноманітні режими навантаження та експлуатаційні впливи.

Ключова перевага стендових випробувань – це висока стабільність підтримання заданих параметрів, таких як частота обертання, крутний момент, температура, тиск або вібраційне навантаження, що неможливо забезпечити в реальних умовах. Це дозволяє отримувати дуже точні і повторювані результати, виключаючи вплив випадкових зовнішніх факторів, таких як стан дорожнього покриття, погодні умови або майстерність оператора.

Наприклад, випробування двигуна на гальмівному електромеханічному стенді дозволяють зняти його зовнішню швидкісну характеристику, визначити питому витрату палива в різних режимах і оцінити динамічні показники при різкому зміненні навантаження. Стенди для повнокомплектних автомобілів, такі як роликові або барабанні, імітують рух по дорозі, дозволяючи оцінити тягово-швидкісні якості, витрату палива в стандартизованих циклах, ефективність гальмування та шумові характеристики.

Окремим і найважливішим класом є динамічні стенди для випробувань на пасивну безпеку, де за допомогою катапульт або маятникових систем імітуються лобові, бічні та задні зіткнення, а за допомогою спеціальних манекенів-датчиків реєструється ступінь пошкоджень, еквівалентних травмам людини.

3. Види випробувань: ходові (натурні)

Ходові, або натурні, випробування є логічним і незамінним доповненням до стендових досліджень, оскільки переносять об'єкт у реальне, а не імітоване середовище. Їхня основна мета – оцінити, як технічна система функціонує в умовах, максимально наближених до

експлуатаційних, з усією їхньою невизначеністю, складністю взаємодії та впливом випадкових факторів. Ці випробування проводяться на спеціально підготовлених полігонах, що мають різноманітні ділянки доріг з різними типами покриттів (асфальт, бруківка, гравій), бездоріжжя, круті підйоми та спуски, водні перешкоди та спеціальні траси з заданою геометрією.

Саме під час ходових випробувань виявляються такі якості автомобіля, як прохідність, здатність долати укоси, стійкість і керованість на граничних режимах, ефективність роботи підвіски на нерівностях, а також комфортабельність – рівень вібрацій і шуму в салоні. Наприклад, для оцінки прохідності автомобіль змушують рухатися по глибокому піску, брудую чи снігу, оцінюючи можливість старту, руху та гальмування в цих умовах.

Для визначення максимальної швидкості та динаміки розгону використовуються довгі прямі ділянки з твердим покриттям, а для оцінки керованості – спеціальні майданчики з нанесеною розміткою для руху по колу або «вісімки». Важливою складовою ходових випробувань є вимірювання параметрів за допомогою встановлених на автомобіль приладів, таких як «п'яте колесо» для точного визначення швидкості, пройденого шляху та часу розгону, а також різноманітних датчиків кутових швидкостей, прискорень та кутів повороту керма.

Таким чином, ходові випробування дають комплексне уявлення про поведінку системи в реальному світі, виявляючи недостатки, які могли залишитися непоміченими в стерильних умовах лабораторії.

4. Види випробувань: експлуатаційні

Експлуатаційні випробування є найбільш тривалим і комплексним видом оцінки, оскільки вони проводяться не на полігоні, а в реальних умовах експлуатації, звичайними водіями і з повним виконанням транспортної роботи, на яку система розрахована. Якщо стендові та полігонні випробування можна вважати «іспитом» у спрощених, але контрольованих умовах, то експлуатаційні – це довгострокове «стажування» в польових умовах.

Основна їхня мета – зібрати статистично значущу інформацію про надійність, довговічність, ремонтопридатність та економічну ефективність технічної системи протягом значної частини її життєвого циклу. Для цього відбирається партія серійних зразків, які передаються

на експлуатацію в типові для даного типу техніки організації – наприклад, автомобілі можуть бути передані в таксопарк, службу кур'єрської доставки або будівельну компанію. Протягом всього терміну випробувань ведеться суворий облік всіх параметрів: пробігу, витрати палива та мастильних матеріалів, обсягів перевезень, часу простою через технічне обслуговування та ремонти, характеру та частоти відмов.

Кожна несправність, кожен випадок відмови ретельно документується, аналізується і класифікується. Саме в ході експлуатаційних випробувань виявляються «дитячі хвороби» нової моделі, пов'язані з конструктивними або виробничими недоліками, які не проявляли себе при короткочасних інтенсифікованих випробуваннях.

Крім того, цей вид випробувань дозволяє оцінити справжню ергономіку робочого місця оператора, зручність проведення планового технічного обслуговування, доступність вузлів для ремонту та загальну задоволеність кінцевого споживача. Отримані дані є незамінними для розробки регламентів технічного обслуговування, формування гарантійної політики виробника та планування модернізації моделі в майбутньому.

5. Прискорені та форсовані випробування

У сучасних умовах жорсткої конкуренції та швидкої зміни технологій час, необхідний для проведення повномасштабних експлуатаційних випробувань, що тривають роками, часто є непозбавною розкішшю. Саме для скорочення часу отримання інформації про довговічність і надійність виробу були розроблені методи прискорених і форсованих випробувань. Прискорені випробування базуються на принципі фізичного та математичного моделювання процесів зношування та старіння матеріалів і вузлів.

Мета полягає не в тому, щоб просто «прогнати» виріб у важких умовах, а в тому, щоб створити такі режими навантаження, які викликають ті самі види руйнувань і механізми відмов, що й при нормальній експлуатації, але за значно коротший час. Це досягається шляхом інтенсифікації найбільш руйнівних факторів. Наприклад, для оцінки довговічності підвіски можуть використовуватися вібраційні стенди, де автоміль закріплюється на платформі, що здійснює коливання з амплітудою і частотою, значно перевищують типові дорожні нерівності.

Для імітації корозійного впливу використовуються соляні камери, де високі концентрації солі, підвищена температура і вологість

створюють ефект, еквівалентний багаторічній експлуатації в зимових умовах з протиожеледними реагентами. Форсовані випробування є ще більш жорстким варіантом, коли навантаження підвищуються до рівнів, що перевищують гранично допустимі за технічними умовами.

Вони проводяться з метою визначення запасів міцності конструкції, виявлення «слабих ланок» і дослідження механізмів катастрофічних відмов. Важливо розуміти, що результати таких випробувань потребують грамотної інтерпретації та екстраполяції на реальні умови експлуатації з використанням теорії подібності та знань про фізику процесів руйнування, інакше вони можуть призвести до некоректних висновків.

6. Планування та програма випробувань

Планування випробувань є складним багатоетапним процесом, який перетворює абстрактну мету «перевірити якість» у конкретний, деталізований і технологічно реалізований план дій. Результатом цього процесу є основний документ – Програма і методика випробувань (ПМВ). Розробка ПМВ починається з чіткого визначення цілей і завдань. Наприклад, метою може бути «підтвердження відповідності автомобіля вимогам Технічного регламенту щодо безпеки колісних транспортних засобів».

Далі формується номенклатура показників, що підлягають оцінці – для автомобіля це можуть бути ефективність гальмування, рівень шуму, обмеження шкідливих викидів, показники пасивної безпеки тощо. Для кожного показника в програмі обов'язково вказуються: нормативне значення (якщо воно є), методика його вимірювання або оцінки, необхідні засоби вимірювальної техніки та умови проведення випробувань (температура, вологість, стан покриття, маса автомобіля).

Особливу увагу приділяють вибору об'єктів випробувань – визначається тип і кількість зразків, їхній технічний стан, умови їхньої підготовки. Важливим розділом програми є опис достатньої статистики – мінімального обсягу даних, який необхідно отримати для прийняття статистично вірогідного рішення.

Також у програмі зазначаються критерії оцінки результатів – за яких умов виріб вважається таким, що витримав випробування, а за яких – таким, що не витримав. Грамотно складена програма випробувань є не лише інструкцією для інженерів-випробувачів, але й юридичним документом, який може бути використаний при сертифікації,

розгляді рекламацій або судових спорів, оскільки він фіксує процедуру, що гарантує об'єктивність і відтворюваність отриманих результатів.

7. Методика проведення випробувань

Методика проведення випробувань – це практична реалізація програми, детальний алгоритм дій персоналу, що забезпечує стандартизацію процесу та порівнянність результатів, отриманих в різний час і на різних об'єктах. Вона описує послідовність операцій, починаючи з приймання та підготовки зразка.

Підготовка включає зовнішній огляд, перевірку комплектності, заправку паливно-мастильними матеріалами, встановлення необхідних датчиків та апаратури. Критично важливим етапом є обкатка або прогрів системи до стабільних температурних режимів, якщо це передбачено методикою, оскільки характеристики механізмів і матеріалів можуть суттєво змінюватися до і після виходу на робочий режим.

Далі методика детально розписує кожен режим випробувань. Наприклад, для випробувань на паливну економічність може бути прописаний точний маршрут руху з вказівкою ділянок розгону, руху з сталою швидкістю та гальмування, тривалості кожного етапу та необхідних перемикань передач. Для стендових випробувань двигуна методика визначає послідовність встановлення режимів (наприклад, від мінімальної частоти обертання холостого ходу до номінальної потужності), тривалість стабілізації на кожному режимі та перелік параметрів, що підлягають реєстрації (потужність, крутний момент, витрата палива, температура відпрацьованих газів).

Методика також містить опис способів фіксації результатів: форми журналів, формати файлів для автоматизованої системи збору даних, процедури фотографування або відеозйомки. Особливий розділ присвячується діям у нештатних ситуаціях – наприклад, що робити, якщо під час випробування спрацювала аварійна сигналізація або виникли ознаки ненормальної роботи об'єкта. Чітке дотримання методики усіма учасниками процесу є запорукою того, що отримані дані будуть об'єктивними, а результати – легітимними.

8. Оформлення протоколів випробувань

Протокол випробувань є кінцевим і найважливішим документом, що узагальнює всю пророблену роботу і містить вичерпні висновки про якість та властивості об'єкта, що випробовувався. Це не просто звіт про

виконані роботи, а юридичний документ, що має доказову силу і може використовуватися при прийнятті рішень про сертифікацію, запуск у серійне виробництво, пред'явлення рекламацій постачальникам або навіть у судових процесах. Тому до його оформлення висуваються найвищі вимоги щодо чіткості, повноти та неухильного дотримання форм.

Протокол зазвичай містить кілька обов'язкових розділів. Вступна частина включає найменування об'єкта випробувань, його заводський номер, дату та місце проведення випробувань, посилання на Програму і методику, на підставі якої вони проводилися, а також прізвища та посади членів комісії. Далі йде розділ, що описує умови проведення випробувань (температура, вологість, атмосферний тиск), стан об'єкта та застосоване вимірювальне обладнання з обов'язковим зазначенням номерів свідоцтв про їхнє калібрування.

Найбільш об'ємною є частина, що містить результати випробувань. Ці дані подаються у вигляді таблиць, графіків, діаграм та осцилограм, до яких даються необхідні пояснення. Кожен показник супроводжується порівнянням з нормативним значенням, якщо таке існує. Особливо ретельно оформляються описи виявлених відмов, дефектів або відхилень у роботі, що супроводжуються фотоматеріалами.

Завершується протокол висновками, які мають бути конкретними, обґрунтованими та однозначними. У висновках прямо констатується: «Об'єкт випробувань відповідає/не відповідає вимогам технічного завдання (або іншого нормативного документу)», а також перераховуються всі виявлені невідповідності та даються рекомендації щодо їх усунення. Підписання протоколу всіма членами комісії засвідчує колективну відповідальність за достовірність наведених у ньому даних і зроблених висновків.

Питання для самоперевірки

1. Які основні відомості про випробування систем?
2. У чому особливості стендових випробувань?
3. Як проводяться ходові (натурні) випробування?
4. Що включають експлуатаційні випробування?
5. Яка мета прискорених і форсованих тестів?
6. Як складається програма випробувань?
7. Яка методика проведення випробувань?
8. Як оформлюються протоколи випробувань?
9. Наведіть приклад стендового тесту двигуна.

10. Чим відрізняються прискорені випробування від натурних?

2.2.10 Тема 10. Технічні засоби для проведення випробувань та досліджень технічних систем

Вивчення цієї теми є критично важливим, оскільки якість та достовірність будь-якого експериментального дослідження або випробування безпосередньо залежить від використовуваних технічних засобів. Неможливо отримати об'єктивні дані про складну технічну систему без сучасних, точних і надійно каліброваних вимірювальних інструментів та випробувальних установок.

Слід зосередитися на принципах функціонування ключових елементів вимірювального тракту – від датчика, який перетворює фізичну величину на електричний сигнал, до реєструючого обладнання та програмного забезпечення, яке забезпечує обробку та аналіз даних. Розуміння метрологічного забезпечення та інтеграції засобів у комплексні системи є запорукою того, що інженер-дослідник зможе організувати ефективний і достовірний експеримент.

1. Загальні відомості про технічні засоби

Технічні засоби для проведення випробувань та досліджень являють собою сукупність апаратних і програмних компонентів, призначених для створення необхідних умов, вимірювання параметрів та реєстрації даних про поведінку досліджуваного об'єкта. Їхнє використання визначається необхідністю переходу від якісної оцінки властивостей до кількісних, об'єктивних показників, які можна порівняти зі стандартами та проектними вимогами.

Усю сукупність цих засобів можна умовно поділити на три основні групи, кожна з яких виконує свою унікальну функцію в експерименті:

1) Випробувальне (стендове) обладнання, яке використовується для відтворення навантажень, умов експлуатації та забезпечення необхідного режиму роботи досліджуваного об'єкта; сюди входять гідравлічні преси, динамометричні стенди, кліматичні камери тощо.

2) Вимірювально-діагностичне обладнання, яке є «очима» та «вухами» експерименту, що здійснює збір первинної інформації про фізичні процеси (датчики, перетворювачі, підсилювачі, аналізатори).

3) Обладнання для обробки та реєстрації даних, що включає реєстратори, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), комп'ютери та спеціалізоване програмне забезпечення, яке перетворює електричні сигнали на зручні для аналізу графіки, таблиці та звіти.

Важливо усвідомити, що ефективність всієї системи визначається найслабшою ланкою: навіть найточніший датчик не дасть достовірного результату, якщо його сигнал буде спотворено неякісним підсилювачем або некоректно оброблено програмним забезпеченням. Тому загальною вимогою до всіх технічних засобів є їхня надійність, точність та метрологічна повіреність, що гарантує достовірність результатів експерименту.

2. Датчики: принцип дії та класифікація

Датчик (первинний перетворювач) – це ключовий елемент будь-якої вимірювальної системи, завданням якого є перетворення контрольованої фізичної величини (температури, тиску, деформації, прискорення, сили, потоку) на електричний сигнал (напругу, струм, частоту), зручний для подальшої передачі, обробки та реєстрації. Розуміння принципу дії датчика є фундаментальним для інженера, оскільки визначає його точність, діапазон вимірювань та придатність для конкретних умов випробувань.

Датчики класифікуються за кількома основними ознаками. **За принципом дії** вони поділяються на:

1) Активні (генераторні), які самі генерують електричний сигнал за рахунок вимірюваного процесу (наприклад, термоелектричні датчики – термопари, п'єзоелектричні датчики, що генерують заряд при деформації);

2) Пасивні (параметричні), які змінюють свої електричні параметри (опір, ємність, індуктивність) під впливом вимірюваної величини і вимагають зовнішнього джерела живлення (наприклад, тензорезистори, терморезистори, індуктивні датчики переміщення).

За вимірюваною величиною їх класифікують на датчики температури, тиску, сили (динамометричні), переміщення, кута, прискорення (акселерометри), а також спеціалізовані датчики для контролю якості (наприклад, ультразвукові дефектоскопи). При виборі датчика необхідно враховувати його метрологічні характеристики: чутливість (відношення зміни вихідного сигналу до зміни вхідної величини), діапазон вимірювання, статичну та динамічну похибку, а також його

інерційність (час реакції). У складних технічних системах, як-от транспортні засоби, використовуються сотні датчиків, інтегрованих в бортові системи контролю, що вимагає забезпечення їхньої стійкості до вібрацій, електромагнітних перешкод та екстремальних температур, що є окремою задачею вимірювальної техніки.

3. Підсилювачі сигналів у вимірювальних системах

Підсилювач сигналів є проміжною, але вкрай важливою ланкою вимірювального тракту, що розташовується між датчиком та реєструючим обладнанням. Його основна функція – збільшення амплітуди слабкого електричного сигналу, отриманого від датчика (особливо пасивного чи тензометричного), до рівня, достатнього для точної реєстрації аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) або іншим реєструючим пристроєм.

Окрім збільшення амплітуди, якісний підсилювач виконує низку інших **критичних завдань:**

1) Узгодження імпедансу – забезпечення оптимального електричного зв'язку між високоомним або низькоомним датчиком і наступними елементами тракту;

2) Фільтрація – усунення або значне зменшення рівня небажаних зовнішніх перешкод, шумів та високочастотних складових, які можуть спотворити корисний сигнал, що є особливо важливим при випробуванні електромеханічних систем;

3) Лінеаризація та корекція сигналу – в деяких випадках підсилювач може містити схеми для корекції нелінійності вихідної характеристики датчика.

У випробувальних системах часто застосовуються диференціальні підсилювачі, які вимірюють різницю потенціалів між двома точками, що дозволяє ефективно виключити синфазні перешкоди, тобто шуми, що наводяться одночасно на обидва вимірювальні провідники.

До ключових характеристик підсилювача, які необхідно контролювати, відносяться коефіцієнт підсилення, його стабільність, смуга пропускання (здатність пропускати сигнали в потрібному діапазоні частот без спотворень) та власний шум. Неправильно вибраний або неякісний підсилювач може стати джерелом систематичної або динамічної похибки, що нівелює зусилля, витрачені на вибір точного датчика.

4. Реєструюче обладнання для випробувань

Реєструюче обладнання (data acquisition systems, DAS) є кінцевою ланкою вимірювального тракту, яке приймає оброблений та підсилений електричний сигнал і перетворює його на цифрові дані для зберігання та подальшого аналізу.

Основним елементом цього обладнання є **аналого-цифровий перетворювач (АЦП)**. Ключовими характеристиками реєструючого обладнання є:

1) Частота дискретизації (sampling rate), яка визначає, скільки разів на секунду вимірюється сигнал. Цей параметр має відповідати теоремі Котельникова (Найквіста), згідно з якою частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за найвищу частоту, що міститься у вимірюваному сигналі, інакше виникне ефект накладання спектрів (aliasing), що призведе до спотворення даних.

2) Розрядність (resolution), яка вимірюється в бітах (наприклад, 12, 16 або 24 біти) і визначає точність перетворення сигналу, тобто кількість рівнів, на які може бути розбитий діапазон вимірювання. Вища розрядність забезпечує меншу похибку квантування.

3) Кількість каналів – здатність одночасно реєструвати сигнали від багатьох датчиків.

Сучасне реєструюче обладнання – це часто багатоканальні пристрої або спеціалізовані комп'ютерні плати, які забезпечують синхронну реєстрацію всіх каналів, що є критичним для аналізу динамічних процесів та причинно-наслідкових зв'язків.

Окрім самих АЦП, до реєструючого обладнання належать накопичувачі даних (data loggers), які можуть працювати автономно в умовах польових випробувань, та високошвидкісні цифрові осцилографи для візуалізації та запису швидкоплинних процесів. Надійність та швидкість роботи реєструючого обладнання є вирішальними для отримання повного та неспотвореного набору даних про експеримент.

5. Стендове обладнання для транспортних систем

Стендове обладнання є основою для проведення контрольованих та відтворюваних випробувань технічних систем, особливо в галузі транспорту. Його основна функція – імітація реальних експлуатаційних умов та навантажень на об'єкт, що дозволяє досліджувати його поведінку в безпечному та контрольованому лабораторному середовищі.

Для транспортних систем виділяють кілька ключових типів стендів.

1) Динамометричні стенди (роликові стенди) використовуються для випробувань двигунів внутрішнього згоряння, трансмісій або цілих автомобілів. Вони імітують навантаження, що виникають при русі, дозволяючи виміряти потужність, крутний момент, а також оцінити паливну ефективність та рівень викидів (екологічні випробування).

2) Стенди для випробування на міцність та ресурс (надійнісні стенди), які застосовують для перевірки рам, кузовів, елементів підвіски. Вони використовують гідропунічні приводи для циклічного створення навантажень, що імітують рух по нерівностях, прискорюючи процес зношування (прискорені випробування).

3) Кліматичні камери – стенди, які відтворюють екстремальні температури, вологість та тиск, необхідні для оцінки працездатності системи в умовах спеки, холоду чи високогір'я.

4) Стенди для вібраційних випробувань, що використовуються для оцінки стійкості електронних компонентів та механізмів до вібраційного навантаження, яке є неминучим у транспорті. Високотехнологічне стендове обладнання часто є багатоосьовим і управляється складними комп'ютерними системами керування, які забезпечують точну відтворюваність заданого профілю навантажень. Грамотне застосування стендового обладнання дозволяє ізолювати вплив окремих факторів, що неможливо зробити під час польових випробувань, значно підвищуючи точність та інформативність експерименту.

6. Програмне забезпечення для обробки сигналів

Програмне забезпечення (ПЗ) є невід'ємною частиною сучасної вимірювальної системи, виконуючи функцію «інтелекту», який перетворює сирі цифрові дані на корисну інженерну інформацію. Його можна розділити на дві основні категорії:

1) ПЗ для збору даних (DAQ Software), яке керує реєструючим обладнанням (налаштовує частоту дискретизації, канали, калібрування) та забезпечує збереження інформації у потрібному форматі;

2) ПЗ для аналізу та візуалізації. Задачі цього ПЗ є багатогранними. Насамперед, це первинна обробка сигналів: усунення дрейфу

нуля, корекція похибок, фільтрація шумів та перетворення безрозмірних значень АЦП на фізичні величини (наприклад, Вольти на Ньютони чи градуси Цельсія) з використанням калібрувальних коефіцієнтів.

Далі, це складний аналіз у часовій та частотній областях: спектральний аналіз (швидке перетворення Фур'є - FFT) для виявлення резонансних частот та джерел вібрації, статистичний аналіз для оцінки надійності, середніх значень та дисперсії, а також кореляційний аналіз для виявлення зв'язків між різними параметрами.

Сучасне ПЗ (наприклад, LabVIEW, MATLAB, спеціалізовані пакети виробників) часто надає потужні засоби візуалізації – побудову графіків, гістограм, діаграм Сміта чи водоспадних діаграм для динамічних процесів, що значно полегшує інтерпретацію результатів та прийняття конструктивних рішень. Ефективність роботи інженера-дослідника значною мірою залежить від його вміння правильно вибрати та налаштувати ПЗ для адекватного аналізу експериментальних даних.

7. Калібрування та метрологічне забезпечення

Калібрування та метрологічне забезпечення є фундаментом достовірності будь-яких випробувань і є не технологічною, а нормативною та правовою вимогою. **Калібрування** – це операція, яка встановлює співвідношення між показаннями вимірювального приладу (датчика, реєструючого обладнання) та фактичними значеннями вимірюваної величини, які забезпечуються еталонним засобом.

Воно проводиться з метою визначення та коригування похибок вимірювального тракту. Метрологічне забезпечення – це комплексна система, що включає організаційні структури (метрологічні служби, стандарти), технічні засоби (еталони, калібратори) та правила, які гарантують єдність та необхідну точність вимірювань у країні або галузі.

Основним принципом є простежуваність (traceability): кожен засіб вимірювання, що використовується у випробуванні, повинен бути повірений або калібрований відносно еталона, який, своєю чергою, пов'язаний з національним (або міжнародним) первинним еталоном. Це створює ланцюг довіри до отриманих даних.

Некалібрований датчик, що має, наприклад, температурний дрейф, може внести систематичну похибку у всі результати, що зробить висновки випробувань хибними, навіть якщо експеримент був проведе-

ний ідеально. Тому регулярне калібрування та документальне оформлення свідоцтв про повірку є обов'язковою умовою для сертифікації випробувальних лабораторій та визнання результатів випробувань.

8. Інтеграція засобів у комплексні системи

Сучасні дослідження складних технічних систем вимагають не просто набору окремих приладів, а їхньої інтеграції у єдині комплексні вимірювально-випробувальні системи (КВВС). Така інтеграція забезпечує синхронність, автоматизацію та централізоване керування всіма елементами експерименту. КВВС складається з:

1) Випробувального стенду з приводами та системами навантаження;

2) Багатоканальної системи збору даних (DAQ), здатної одночасно реєструвати сигнали з сотень датчиків;

3) Системи керування експериментом, яка забезпечує виконання програми випробувань, автоматичне дозування навантажень та моніторинг безпеки;

4) Робочої станції з програмним забезпеченням для керування та аналізу.

Ключовими перевагами інтеграції є: Автоматизація: можливість проведення тривалих циклічних випробувань (надійність, ресурс) без постійної участі оператора. Синхронізація: гарантія того, що всі вимірювання, зроблені в різних точках системи, прив'язані до одного і того ж моменту часу, що є критичним для динамічного аналізу.

Висока інформативність: можливість збору величезного масиву даних, що дозволяє виявити складні кореляційні залежності та системні ефекти. Наприклад, у сучасній авіації чи автомобілебудуванні, КВВС дозволяє моделювати навантаження на всі колеса чи крила одночасно, реєструючи при цьому сотні параметрів, що значно підвищує об'єктивність та швидкість дослідження. Ефективна інтеграція технічних засобів є вищим рівнем організації експериментальних досліджень, що дозволяє вирішувати найбільш складні інженерні задачі.

Питання для самоперевірки

1. Які технічні засоби використовуються у випробуваннях?
2. Як класифікуються датчики за принципом дії?
3. Яка роль підсилювачів у вимірюваннях?
4. Що включає реєструюче обладнання?

5. Яке стендове обладнання застосовується для автомобілів?
6. Як використовується ПЗ для обробки сигналів?
7. Як проводиться калібрування засобів?
8. Як інтегруються засоби в комплексні системи?
9. Наведіть приклад датчика для вимірювання моменту.
10. Які вимоги до метрологічного забезпечення?

2.2.11 Тема 11. Проведення технічних вимірювань при випробуваннях та дослідженнях технічних систем

1. Основні поняття та визначення вимірювань

Технічні вимірювання становлять фундаментальну основу будь-яких випробувань та експериментальних досліджень, трансформуючи якісні спостереження за поведінкою технічної системи в кількісні дані, придатні для аналізу, порівняння та прийняття обґрунтованих рішень. Визначення вимірювання як процесу знаходження значення фізичної величини досить добре розкриває його сутність.

Проте для глибокого розуміння необхідно розглядати його в контексті створення та оцінки технічних систем. Метою будь-якого вимірювання під час випробувань є отримання інформації про стан або властивість об'єкта з заданою точністю та достовірністю. Цей процес завжди передбачає порівняння вимірюваної величини з її одиницею, що реалізовано в засобах вимірювальної техніки.

Ключовим аспектом є поняття фізичної величини, яка поділяється на основні, що прийняті за незалежні, та похідні, які визначаються через основні. Система SI, що включає сім основних одиниць, забезпечує єдність і точність вимірювань у всьому світі, усуваючи необхідність у складних переказних коефіцієнтах і забезпечуючи коректність інженерних розрахунків. Важливо розрізняти вимірювані та невимірювані параметри якості.

До перших належать фізичні величини, такі як сила, тиск, температура, швидкість, які можна безпосередньо або опосередковано порівняти з еталоном. До других – суб'єктивні або комплексні характеристики, такі як зручність керування, раціональність форми чи щільність компонування, оцінка яких часто ґрунтується на експертних судженнях або балльних шкалах, але, тим не менш, може формалізуватися за допомогою спеціальних методик. Таким чином, вимірювання в технічній сфері – це не просто технічна процедура, а складний процес, що

поєднує в собі метрологічні принципи, знання про природу досліджуваного об'єкта та вимоги конкретного завдання, що стоїть перед дослідником.

2. Методи вимірювання зношення деталей

Вимірювання зношування деталей є одним з найважливіших і водночас найскладніших завдань при дослідженні довговічності та надійності технічних систем, оскільки зношування є поступовим процесом, що призводить до зміни розмірів, форми та властивостей поверхневих шарів матеріалу. Вибір методу вимірювання визначається цілим рядом критеріїв, серед яких поставлена мета дослідження, необхідна точність, можливість виміру малих зношувань, час, необхідний для виміру, а також можливість проводити вимірювання без розбирання вузла або навіть без зупинки машини.

Найпростіші методи, такі як вимір мікрометром або штангенциркулем, дають загальне уявлення про зміну геометричних розмірів, але вони часто недостатньо точні і не дозволяють оцінити нерівномірність зношування по всій поверхні. Більш досконалими є диференціальні методи, зокрема, профілографія, яка дозволяє отримати профіль поверхні з високою точністю і визначити розподіл зношування, що є критично важливим для аналізу впливу нерівномірності зношування на функціонування вузла.

Для вимірювання дуже малих зношувань або для вивчення процесів, що протікають у приповерхневих шарах, застосовуються оптичні (інтерферометричні) методи та методи, що використовують ядерно-фізичні процеси. Останні, наприклад, дозволяють вводити радіоактивні мітки в матеріал і за інтенсивністю випромінювання судити про інтенсивність зношування в реальному часі без розбирання механізму.

Окремі методи ґрунтуються на оцінці зношування за зміною непрямих показників, таких як збільшення зазорів у сполученні, поява продуктів зношування в мастильному матеріалі (аналіз феросиментації) або погіршення вихідних параметрів вузла (наприклад, падіння потужності двигуна через знос циліндропоршневої групи).

Кожен з цих методів має свою область застосування, переваги та недоліки, і часто для отримання повної картини необхідно використовувати їх у комбінації, що дозволяє не тільки кількісно оцінити знос, але й зрозуміти його механізм та причини.

3. Модельний експеримент у вимірюваннях

Модельний експеримент є потужним інструментом у арсеналі дослідника, коли проведення вимірювань безпосередньо на натурному об'єкті є надто складним, дорогим, небезпечним або просто неможливим через його масштаби або унікальність. Сутність цього підходу полягає у заміні оригінального об'єкта (прототипу) його моделлю – фізичною або математичною, – яка зберігає основні властивості, що цікавлять дослідника, але дозволяє значно спростити процес вимірювань.

Фізичне моделювання передбачає створення зменшеної або, рідше, збільшеної копії об'єкта, на якій проводяться всі необхідні вимірювання. Критично важливим при цьому є дотримання теорії подібності, яка визначає критерії, за яких процеси, що протікають у моделі, будуть аналогічні процесам у прототипі. Це вимагає дотримання певних безрозмірних критеріїв подібності, таких як числа Рейнольдса для гідродинамічних процесів або числа Фруда для гравітаційних явищ.

Математичне моделювання передбачає створення абстрактного опису об'єкта у вигляді системи рівнянь, що відображають зв'язок між його параметрами. У цьому випадку «вимірювання» проводяться шляхом проведення обчислювальних експериментів на цій моделі.

Напівнатурне моделювання поєднує в собі елементи обох підходів, коли реальна апаратура працює в контурі з математичною моделлю інших частин системи. Наприклад, реальна система керування двигуном може бути підключена до комп'ютера, що імітує роботу самого двигуна, дозволяючи проводити вимірювання характеристик контролера в безпечних і контрольованих умовах.

Використання модельних експериментів дозволяє значно скоротити час і вартість досліджень, вивчати поведінку системи в граничних і аварійних режимах без ризику її пошкодження, а також оптимізувати конструкцію ще до створення дорогого натурного зразка.

4. Методи обробки експериментальних даних

Отримання первинних даних у ході вимірювань – це лише початок шляху; справжня цінність цих даних розкривається лише після їх ретельної та грамотної обробки. Методи обробки експериментальних даних є універсальним інструментом, що дозволяє перейти від масиву окремих, часто заваджених вимірювань до стійких статистичних висновків і математичних моделей, що описують поведінку досліджува-

ного об'єкта. Початковим етапом завжди є первинна обробка, яка включає в себе перевірку даних на наявність грубих промахів, їх сортування та систематизацію.

Для аналізу одномерних вибірок широко використовуються статистичні характеристики: середнє арифметичне, що визначає центральну тенденцію вибірки; дисперсія та середньоквадратичне відхилення, що характеризують розкид даних навколо середнього; а також мода та медіана, що дають додаткову інформацію про розподіл. Для візуалізації розподілу будуються гістограми та полігони частот.

Якщо дані представлені у вигляді залежності однієї величини від іншої, наприклад, витрати палива від швидкості руху, застосовуються методи регресійного аналізу для знаходження аналітичного виразу цієї залежності. Це дозволяє не тільки описувати наявні дані, але і прогнозувати значення величини в тих діапазонах, де виміри не проводилися.

Для аналізу багатовимірних даних, коли на об'єкт одночасно впливає безліч факторів, використовуються методи кореляційного та дисперсійного аналізу, що дозволяють виявити наявність і силу зв'язків між різними параметрами. Сучасна обробка даних нерозривно пов'язана з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє автоматизувати рутинні операції та застосовувати складні математичні процедури, що робить аналіз більш глибоким і об'єктивним.

5. Перевірка статистичних гіпотез

Перевірка статистичних гіпотез є логічним продовженням обробки експериментальних даних, що дозволяє перейти від опису вибірки до обґрунтованих висновків щодо генеральної сукупності або для порівняння різних наборів даних між собою. Цей інструмент є ключовим для прийняття рішень під час випробувань, коли необхідно об'єктивно оцінити, чи свідчать отримані дані про наявність певного ефекту, чи це лише наслідок випадкових коливань.

Процес перевірки гіпотези починається з формулювання двох взаємовиключних тверджень: нульової гіпотези та альтернативної. Наприклад, нульова гіпотеза може стверджувати, що середня витрата палива нової моделі автомобіля не відрізняється від витрати палива моделі-попередниці, а альтернативна – що відрізняється. Далі, на основі даних вибірки, обчислюється певна статистика – критерій, розподіл якого відомий за умови справедливості нульової гіпотези. Порівнюючи отримане значення критерію з критичним значенням для обраного

рівня значущості, приймається рішення: відкинути нульову гіпотезу або відкинути її. Рівень значущості, який зазвичай вибирають рівним 0.05 або 0.01, визначає ймовірність помилки першого роду – тобто ймовірність відкинути нульову гіпотезу, коли вона насправді вірна.

Поширеними критеріями є t-критерій Стьюдента для порівняння середніх значень, F-критерій Фішера для порівняння дисперсій та критерій хі-квадрат для перевірки згоди розподілу з теоретичним. Правильне застосування цих методів дозволяє з високою впевненістю стверджувати, чи призвели конструктивні зміни до статистично значущого поліпшення параметрів, чи чи є різниця в довговічності двох партій деталей істотною, що є основою для об'єктивних та неупереджених технічних висновків.

6. Похибки вимірювань та їх класифікація

Жодне вимірювання не може бути виконане абсолютно точно; розбіжність між результатом вимірювання та істинним значенням величини становить сутність похибки. Розуміння природи, джерел та способів оцінки похибок є обов'язковою умовою коректної інтерпретації будь-яких експериментальних даних. Усі похибки прийнято класифікувати за характером їх прояву на систематичні, випадкові та грубі.

Систематичні похибки – це постійно діючі складові, що зсувають результат вимірювання в один бік від істинного значення. Їхня причина може критися в неправильній калібруванні приладу, у методиці вимірювання, що не враховує якийсь фактор, або в особистих помилках оператора. Наприклад, якщо тензометрична станція не була правильно знулена, всі вимірювання деформацій будуть містити однаковий зсув.

Систематичні похибки особливо небезпечні, оскільки їх важко виявити при одноразовому вимірі, і вони накопичуються. Випадкові похибки, навпаки, мають непередбачуваний характер і різний знак; вони обумовлені сумою великої кількості неконтрольованих факторів (мікроколивання температури, вібрації, електромагнітні перешкоди).

Їхній вплив ніяк не можна усунути, але його можна оцінити та зменшити шляхом багаторазових вимірювань і статистичної обробки результатів. Грубі похибки (промахи) – це різкі відхилення, викликані раптовим зовнішнім впливом, неправильним відліком оператора або відмовою апаратури. Такі результати повинні бути виявлені за спеціальними статистичними критеріями та виключені з подальшого аналізу.

Крім того, похибки поділяють на абсолютні, що виражаються в одиницях вимірюваної величини, та відносні, що показують, яку частку становить похибка від виміряного значення. Оцінка похибок дозволяє не тільки вказати інтервал, в якому з певною ймовірністю знаходиться істинне значення величини, але й оцінити достовірність отриманих висновків.

7. Вибір методу залежно від параметра

Вибір оптимального методу вимірювання є критично важливим рішенням, що безпосередньо впливає на якість та достовірність отриманих даних. Цей вибір ніколи не буває універсальним; він завжди детермінований конкретним параметром, що підлягає виміру, умовами проведення експерименту, вимогами до точності та наявним ресурсам.

Ключовим критерієм є фізична природа параметра. Для вимірювання механічних величин, таких як сила або тиск, найчастіше використовуються методи, що базуються на перетворенні механічної деформації в електричний сигнал за допомогою тензорезисторів, п'єзоелементів або індуктивних датчиків. Для вимірювання температури застосовуються термопари, терморезистори або пірометри, вибір між якими залежить від діапазону температур, необхідної швидкодії та умов середовища.

Вимірювання швидкості обертання валу може здійснюватися тахогенераторами, індуктивними або оптичними датчиками. Крім природи параметра, важливим фактором є умови експлуатації: у середовищах з високою температурою, агресивними речовинами або сильними вібраціями можуть бути застосовні лише спеціальні, стійкі до цих впливів, датчики.

Точність методу повинна бути адекватною поставленому завданню; застосування надто точного та дорогого методу для оцінки параметра з великим технологічним розкидом є нераціональним, так само як і використання грубого методу для вимірювання критичних параметрів. Також враховується частотна характеристика методу: для вимірювання швидкоплинних процесів необхідні датчики з високою швидкодією, тоді як для статичних або повільно змінних величин ця вимога не є критичною. Таким чином, вибір методу – це завжди компроміс між точністю, вартістю, складністю та надійністю, що вимагає від інженера глибокого розуміння як метрології, так і фізики досліджуваного об'єкта.

8. Автоматизація вимірювального процесу

Автоматизація вимірювального процесу є закономірним етапом його розвитку, що дозволяє підвищити продуктивність, точність та об'єктивність досліджень, особливо при випробуваннях складних технічних систем, що генерують величезні масиви даних у реальному часі.

Сучасна автоматизована система вимірювань є складним апаратно-програмним комплексом, який інтегрує в собі первинні перетворювачі (датчики), пристрої нормалізації сигналів, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та комп'ютер із спеціалізованим програмним забезпеченням. Ключовою ланкою є пристрої нормалізації, які вирівнюють рівні сигналів від різнотипних датчиків, підсилюють їх, фільтрують від перешкод і забезпечують гальванічну розв'язку, що підвищує завадостійкість і безпеку системи.

Сучасним трендом є розвиток інтегрованих структур «датчик-пристрій нормалізації», де обидва компоненти виконуються у вигляді єдиного мікрокристала, що забезпечує високу стабільність і мініатюризацію. АЦП перетворюють аналоговий сигнал в цифровий код, при цьому роздільна здатність і швидкість перетворення АЦП безпосередньо впливають на точність і можливість реєстрації швидкоплинних процесів.

Програмне забезпечення забезпечує керування всією системою, задає програми вимірювань, здійснює збір даних, їх первинну обробку, візуалізацію в реальному часі та збереження в структурованих базах даних. Автоматизація дозволяє проводити тривалі випробування без безперервної присутності оператора, виключає суб'єктивні помилки при знятті відліків, забезпечує строгу синхронізацію всіх вимірювальних каналів і дає можливість здійснювати оперативний контроль за ходом експерименту з подальшим автоматичним формуванням звітів і протоколів. Це не тільки підвищує ефективність роботи, але і відкриває можливості для реалізації складних методик, таких як активний експеримент з адаптивним зміненням режимів навантаження на основі аналізу отриманих даних в реальному часі.

Питання для самоперевірки

1. Які основні поняття технічних вимірювань?
2. Назвіть методи вимірювання зношення.
3. У чому суть модельного експерименту?
4. Як обробляються експериментальні дані?

5. Як перевіряються статистичні гіпотези?
6. Які види похибок бувають у вимірюваннях?
7. Як вибрати метод вимірювання параметра?
8. Яка роль автоматизації у вимірюваннях?
9. Наведіть приклад обробки даних зношення.
10. Як впливає похибка на результати випробувань?

2.2.12 Тема 12. Випробування технічних систем на надійність

Вивчення цієї теми є одним із найбільш важливих для інженера-дослідника, оскільки надійність є інтегральною властивістю, що визначає ефективність, безпеку та економічну доцільність будь-якої технічної системи. Надійність завжди має імовірнісний характер, оскільки відмови та зношування є наслідком впливу випадкових факторів.

Тому дослідження надійності неможливе без глибокого розуміння апарату теорії ймовірностей та математичної статистики. Слід усвідомити, як випадкові величини та їхні характеристики описують час безвідмовної роботи, як статистичні методи дозволяють прогнозувати ресурс системи на основі обмежених випробувань та як правильно планувати, проводити та обробляти результати таких досліджень для отримання об'єктивних показників надійності.

1. Короткі відомості з теорії ймовірностей

Теорія ймовірностей є математичною основою для випробувань на надійність, оскільки явища відмов, пошкоджень та зношування технічних систем мають випадковий характер. Основна мета її застосування – кількісна оцінка можливості настання певної події, пов'язаної з функціонуванням системи, наприклад, ймовірності безвідмовної роботи протягом заданого часу P(t) або ймовірності відмови Q(t).

Серед ключових понять, які необхідно засвоїти, є: подія (наприклад, «система відмовила протягом перших 100 годин роботи»), простір елементарних подій (усі можливі результати), відносна частота як емпірична оцінка ймовірності, а також аксіоми ймовірності. Особливу увагу слід приділити поняттям незалежних та залежних подій (наприклад, послідовна чи паралельна схема з'єднання елементів) та формулам для обчислення ймовірності їхнього сумісного настання чи об'єднання. Для складних систем, що складаються з багатьох елементів,

формула повної ймовірності та формула Байєса (для переоцінки ймовірностей при появі нової інформації, наприклад, результатів діагностики) стають незамінними інструментами. Розуміння теорії ймовірностей дозволяє перейти від якісних тверджень («система надійна») до строгих кількісних оцінок («ймовірність безвідмовної роботи становить 0.999 за 10 000 годин»), що є єдиним способом об'єктивного вимірювання надійності.

2. Математична статистика у випробуваннях

Якщо теорія ймовірностей формулює загальні закони випадкових явищ, то математична статистика надає інструменти для обробки та аналізу обмеженої кількості експериментальних даних, отриманих під час випробувань, з метою перенесення цих висновків на всю генеральну сукупність виробів. У випробуваннях на надійність, дослідник завжди має справу з вибіркою (кількома випробуваними зразками), за якою необхідно зробити висновки про генеральну сукупність (усі серійні вироби).

Ключові задачі статистики включають:

1) Оцінювання параметрів: знаходження чисельних значень характеристик надійності (наприклад, середній час напрацювання до відмови, λ – інтенсивність відмов) на основі вибіркових даних. Ці оцінки називаються статистиками (наприклад, вибіркове середнє, вибіркова дисперсія).

2) Перевірка статистичних гіпотез: прийняття або відхилення гіпотез про властивості системи (наприклад, гіпотеза про те, що надійність нової моделі вища, ніж у старої) з використанням спеціальних статистичних критеріїв (наприклад, критерій Стьюдента, критерій хі-квадрат) та заданого рівня значущості α.

3) Визначення довірчих інтервалів: оскільки оцінка завжди є наближеною, статистика дозволяє побудувати довірчий інтервал – діапазон, у межах якого з заданою довірчою ймовірністю γ (наприклад, 95%) знаходиться істинне значення параметра.

Застосування математичної статистики є критично важливим, оскільки воно дозволяє інженеру кількісно оцінити невизначеність і гарантувати, що висновки, зроблені на основі експерименту, є статистично значущими та можуть бути поширені на майбутнє серійне виробництво.

3. Випадкові величини та їх характеристики

У контексті надійності, випадкова величина – це числова величина, значення якої не може бути точно передбачене і залежить від випадкових обставин. Основними випадковими величинами, що досліджуються у випробуваннях на надійність, є час безвідмовної роботи T (напрацювання до першої відмови) та кількість відмов N за певний інтервал часу. Ці величини характеризуються за допомогою законів розподілу ймовірностей.

Для опису часу безвідмовної роботи найчастіше використовуються:

1) Експоненціальний розподіл (найпростіший, застосовується для опису відмов на етапі нормальної експлуатації, коли інтенсивність відмов λ постійна).

2) Розподіл Вейбулла (більш універсальний, дозволяє моделювати як початкові відмови, так і відмови від зносу).

3) Нормальний розподіл (часто використовується для опису параметричних відмов та зносу). Основними числовими характеристиками випадкових величин є: Математичне сподівання M(T) (середнє значення), яке для часу безвідмовної роботи є середнім часом напрацювання до відмови (СЧНВ).

Дисперсія D(T) та середнє квадратичне відхилення σ(T), які характеризують розсіювання значень навколо середнього і є мірою стабільності роботи системи. Також важливими є функція розподілу F(t) = P(T \le t) (ймовірність відмови до часу t) та функція густини ймовірності f(t). Розуміння закону розподілу та числових характеристик дозволяє не лише описати результати випробувань, а й прогнозувати поведінку системи та розраховувати ймовірнісні показники надійності.

4. Статистичні методи досліджень надійності

Статистичні методи у дослідженнях надійності є інструментарієм, який дозволяє виявити закономірності у випадковому процесі відмов та оцінити показники надійності з використанням отриманих на випробуваннях даних.

Серед основних методів виділяють:

1) Параметричне оцінювання: метод, при якому дані вибірки (напрацювання до відмови) використовуються для оцінки параметрів

певного, попередньо обраного, закону розподілу (наприклад, оцінка параметрів Вейбулла або середнього часу λ для експоненціального розподілу). Використовуються методи максимальної правдоподібності або найменших квадратів.

2) Непараметричне оцінювання: використовується, коли закон розподілу часу безвідмовної роботи невідомий або складний. Найпоширенішим є метод оцінки Каплана-Мейєра для побудови емпіричної функції надійності, який особливо цінний при роботі з неповними даними (цензуруванням), коли деякі зразки не відмовили до кінця випробувань.

3) Регресійний аналіз: застосовується для встановлення кореляційних залежностей між показниками надійності та впливовими факторами (наприклад, температура, навантаження, напруга). Це є основою для прискорених випробувань, де результати, отримані при підвищених навантаженнях, екстраполюються на нормальні умови експлуатації.

4) Аналіз відновлюваних систем: використовується для систем, які ремонтуються після відмови. Тут застосовуються моделі процесів відновлення (наприклад, Пуассонівський процес) для оцінки інтенсивності відмов та коефіцієнта готовності.

Усі ці методи дозволяють інженеру перетворити сирі дані про час до відмови на кількісні показники, які можуть бути використані для прогнозування та прийняття рішень щодо гарантійних зобов'язань та технічного обслуговування.

5. Основні показники надійності

Показники надійності – це кількісні характеристики, які виражаються в одиницях ймовірності, часу, інтенсивності або їх комбінаціях і дозволяють об'єктивно оцінити здатність системи виконувати свої функції протягом заданого часу. Вони поділяються на показники безвідмовності, довговічності, ремонтопридатності та збережуваності. 1) Показники безвідмовності (основні): Ймовірність безвідмовної роботи P(t) – імовірність того, що система не відмовить протягом часу t. Інтенсивність відмов λ(t) – умовна густина ймовірності відмови в момент часу t за умови, що до цього моменту система працювала безвідмовно. Середній час напрацювання до відмови (СЧНВ) M(T). 2) Показники довговічності: Середній ресурс (термін служби) Tсер – час

напрацювання до настання граничного стану (наприклад, знос, корозія). λ-відсотковий ресурс – напрацювання, протягом якого відмова не відбудеться з імовірністю λ. 3) Показники ремонтопридатності: Середній час відновлення Твідн – середній час, необхідний для усунення відмови.

Коефіцієнт готовності Кг – імовірність того, що система перебуватиме в працездатному стані в довільний момент часу (враховує як безвідмовність, так і ремонтопридатність). Вибір конкретного набору показників для випробування визначається технічним завданням та критеріями оцінки, оскільки саме ці показники є числовими вимогами, які мають бути підтверджені результатами випробувань.

6. План і програма випробувань на надійність

План і програма випробувань на надійність (ППВН) є ключовим організаційно-методичним документом, який визначає, як саме будуть проводитися дослідження для отримання достовірних даних. План випробувань визначає кількість зразків n, які будуть випробувані, тривалість випробувань Твипр та критерії для прийняття рішення про відповідність (або невідповідність) вимогам надійності.

Вибір плану залежить від: 1) Призначення системи (одиничне чи серійне виробництво); 2) Вимог до надійності (критичні чи некритичні показники); 3) Обмеження ресурсів (часу, коштів). Наприклад, послідовні плани дозволяють мінімізувати кількість випробувань, але вимагають постійного контролю, тоді як одноступеневі плани більш прості в організації.

Програма випробувань деталізує: 1) Об'єкт випробувань (конкретні зразки); 2) Методику проведення (послідовність операцій, навантажувальні режими, умови середовища); 3) Засоби вимірювань та контролю (перелік каліброваних датчиків, реєструючого обладнання); 4) Критерії відмови та граничного стану (чітке визначення, що саме вважається відмовою).

Для прискорених випробувань програма має також включати обґрунтування форсованих режимів та математичну модель екстраполяції результатів на нормальні умови. Якісно розроблений ППВН є гарантією того, що експеримент буде репрезентативним, а його результати – статистично значущими для висновку про надійність усіх серійних виробів.

7. Обробка результатів випробувань

Обробка результатів випробувань на надійність є багатоетапним статистичним процесом, який перетворює первинні дані (час напрацювання кожного зразка до відмови або цензурування) на кінцеві показники надійності та висновки. Етапи обробки включають:

1) Зведення первинних даних: формування таблиці напрацювань до відмови Ті або до моменту зняття з випробувань (для цензурованих даних).

2) Вибір та перевірка закону розподілу: за допомогою статистичних критеріїв (наприклад, Колмогорова-Смирнова) перевіряється гіпотеза про те, що експериментальні дані підпорядковуються обраному теоретичному закону (наприклад, Вейбулла чи експоненціальному). Цей крок є критичним, оскільки неправильно обраний закон розподілу призведе до помилкових прогнозів.

3) Оцінювання параметрів розподілу: розрахунок числових оцінок параметрів (наприклад, λ, середнє mu, параметр форми β для розподілу Вейбулла) за допомогою методів математичної статистики.

4) Розрахунок показників надійності: обчислення кінцевих показників (ймовірність безвідмовної роботи P(t), СЧНВ, інтенсивність відмов λ(t)) на основі оцінених параметрів розподілу.

5) Визначення довірчих інтервалів: розрахунок довірчих границь для кожного показника, що дозволяє кількісно оцінити точність та надійність отриманих оцінок.

Обробка, як правило, проводиться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує необхідну точність чисельних розрахунків та візуалізацію результатів.

8. Оформлення результатів надійності

Оформлення результатів випробувань на надійність є фінальною стадією досліджень, що має на меті документально зафіксувати отримані дані, проведені розрахунки та висновки щодо відповідності системи вимогам надійності. Результати оформлюються у вигляді протоколів випробувань та акта приймальної комісії (якщо це приймальні чи кваліфікаційні випробування).

Основними елементами оформлення є:

1) Вихідні дані: повний перелік випробуваних зразків, їхні серійні номери, умови та тривалість випробувань, а також детальний

опис усіх зафіксованих відмов (час/напрацювання до відмови, опис причини та характеру відмови).

2) Застосована методика: посилання на ППВН, використаний закон розподілу та статистичні методи оцінювання.

3) Розрахункові показники: обов'язкове наведення числових значень усіх ключових показників надійності (СЧНВ, λ, P(t) для заданого часу) з обов'язковим зазначенням довірчих інтервалів та довірчої ймовірності, що підтверджує статистичну достовірність.

4) Графічні матеріали: побудова емпіричної та теоретичної функції надійності P^*(t), графіків інтенсивності відмов λ(t) та іншої візуалізації.

5) Висновок: чітке та однозначне твердження про те, чи відповідає випробуваний зразок (та, відповідно, вся партія, якщо висновок поширюється на неї) вимогам надійності, встановленим у технічному завданні.

Документально оформлені результати випробувань є юридичною підставою для прийняття рішення про запуск системи в серійне виробництво, встановлення гарантійного терміну та визнання продукції сертифікованою за показниками надійності.

Питання для самоперевірки

1. Які основи теорії ймовірностей потрібні для надійності?
2. Як застосовується математична статистика?
3. Що таке випадкова величина в контексті надійності?
4. Назвіть статистичні методи досліджень.
5. Які основні показники надійності?
6. Як складається план випробувань на надійність?
7. Як обробляються результати випробувань?
8. Як оформлюються висновки про надійність?
9. Наведіть приклад розрахунку MTBF.
10. Чим відрізняються детерміновані та ймовірнісні випробування?

2.2.13 Тема 13. Формування результатів випробувань

1.Загальна структурна схема формування результатів

При вивченні цього пункту слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які представляють універсальну послідовність пе-

ретворення сирих даних випробувань у готові висновки. У мережі доступні освітні ресурси, де схема включає збір первинних даних, попередню обробку, статистичний аналіз, узагальнення, перевірку адекватності та оформлення протоколу. Звертати увагу на те, що схема є ітеративною: при виявленні аномалій повертаються до попередніх етапів.

Під час пошуку рекомендується знайти блок-схеми для автомобільних тестів, де показано шлях від сигналів датчиків до висновків про відповідність нормам. Важливо зрозуміти, що кожний блок схеми має вхідні та вихідні параметри, похибки та методи контролю.

Для поглиблення шукати приклади формування результатів стендових випробувань двигуна, де первинні дані про температуру і тиск обробляються для оцінки потужності. Самостійно намалювати структурну схему з шістьма блоками для ходових випробувань гальм, позначивши стрілки даних, фільтри та критерії відбракування.

Це дозволить візуалізувати потік інформації. Додатково звертати увагу на пояснення, що схема враховує тип випробувань: для контрольних – порівняння з нормами, для дослідницьких – пошук залежностей. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де порушення схеми призводило до хибних висновків, наприклад, ігнорування калібрування датчиків.

Рекомендується знайти статті про схеми для ресурсних тестів трансмісії. Для контролю розуміння скласти покроковий опис схеми для оцінки зношення шин, вказавши інструменти на кожному етапі. Такий підхід сформує системне уявлення про формування результатів як багатоступеневий процес з чіткими переходами та контролем якості даних на всіх рівнях.

2. Точностні характеристики результатів

Опрацьовуючи цей пункт, необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які визначають кількісні та якісні показники достовірності отриманих даних. У відкритих джерелах шукати пояснення похибок вимірювань, довірчих інтервалів, повторюваності, відтворюваності та систематичних відхилень.

Звертати увагу на те, що точність характеризується абсолютною та відносною похибкою, а також коефіцієнтом варіації. Під час пошуку рекомендується знайти формули та приклади розрахунку для автомобільних випробувань, наприклад, похибка вимірювання крутного

моменту на стенді. Важливо зрозуміти, що точностні характеристики залежать від обладнання, методики та умов.

Для закріплення шукати статті про оцінку точності в ходових тестах на витрату палива. Самостійно скласти таблицю характеристик для вимірювання прискорення, вказавши джерела похибок та способи їх зменшення. Це допоможе кількісно оцінити результати.

Додатково звертати увагу на стандарти, які встановлюють граничні похибки. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де низька точність призводила до неправильних рішень. Рекомендується знайти дані про калібрування датчиків тиску. Для контролю скласти розрахунок похибки для температури в двигуні. Такий підхід забезпечить навички оцінки достовірності.

3. Формування результатів контрольних випробувань

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про специфіку обробки даних при перевірці відповідності нормам. У відкритих джерелах шукати схеми, де результати порівнюються з ГОСТами чи технічними умовами, з фіксацією відхилень. Звертати увагу на те, що формування включає відбір зразків, вимірювання, статистичну оцінку та рішення про прийняття.

Під час пошуку рекомендується знайти приклади протоколів контрольних тестів гальм. Важливо зрозуміти, що для партії застосовується вибірковий контроль. Самостійно скласти алгоритм для контролю розмірів поршня. Це систематизує процес. Додатково звертати увагу на брак. У відкритих джерелах часто наводяться приклади. Рекомендується знайти плани контролю. Для контролю скласти протокол для трансмісії. Такий підхід підготує до узагальнення.

4. Формування результатів повторних випробувань

При вивченні цього пункту слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які пояснюють необхідність і порядок проведення повторних випробувань для підтвердження або уточнення попередніх даних. У мережі доступні освітні ресурси, де повторні випробування визначаються як додаткові цикли тестування після виявлення відхилень, модифікації конструкції чи сумнівів у достовірності первинних результатів. Звертати увагу на те, що формування результатів включає порівняння з первинними даними, аналіз розбіжностей, статистичну пе-

ревірку значущості відмінностей та остаточне узагальнення. Під час пошуку рекомендується знайти схеми чи приклади повторних стендових випробувань двигуна після зміни матеріалів поршневої групи, де показано етапи від планування до висновків про покращення ресурсу.

Важливо зрозуміти, що повторні випробування проводяться за тією ж методикою, але з можливим коригуванням умов для усунення джерел похибок, наприклад, калібрування датчиків чи заміна зразків.

Для поглиблення шукати статті про повторні ходові тести гальмівної системи після доопрацювання, де деталізовано обробку даних за допомогою t-критерію Стьюдента для оцінки значущості змін. Самостійно скласти покроковий алгоритм формування результатів для повторного тесту трансмісії на шум, позначивши блоки: підготовка, вимірювання, порівняння з первинними значеннями, статистичний аналіз, висновок про ефективність змін.

Це дозволить побачити, як повторні дані підтверджують або спростовують гіпотезу про вдосконалення. Додатково звертати увагу на пояснення, що повторні випробування часто застосовуються при сертифікації, коли перша серія не пройшла за одним параметром, наприклад, викиди.

У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де повторні тести з меншою вибіркою, але вищою точністю, дозволяли уникнути повного перезапуску виробництва. Рекомендується знайти протоколи повторних експлуатаційних випробувань шин на зносостійкість після зміни складу гуми. Для контролю розуміння скласти таблицю порівняння первинних і повторних результатів для оцінки вібрації підвіски, вказавши похибки, довірчі інтервали та висновки. Такий підхід сформує навички критичного аналізу даних і обґрунтування необхідності повторних циклів, що є ключовим при валідації конструктивних рішень у транспортних системах.

5. Методи підвищення точності результатів

Опрацьовуючи цей пункт, необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які систематизують практичні способи зменшення похибок і підвищення достовірності вимірювань під час випробувань. У відкритих джерелах шукати пояснення методів: калібрування обладнання, збільшення кількості вимірювань, усунення систематичних похибок, застосування еталонних зразків, фільтрація шумів, статистична обробка. Звертати увагу на те, що підвищення точності досягається

комбінацією технічних і організаційних заходів. Під час пошуку рекомендується знайти приклади для стендових випробувань двигуна, де калібрування динамометра зменшило похибку вимірювання потужності на 0,5 %. Важливо зрозуміти, що методи залежать від типу похибки: для випадкових – повторення, для систематичних – корекція.

Для закріплення шукати статті про підвищення точності в ходових тестах на витрату палива за допомогою GPS і корекції на температуру. Самостійно скласти ієрархію методів з чотирма рівнями для вимірювання прискорення автомобіля, позначивши для кожного спосіб реалізації, очікуване зменшення похибки та обладнання.

Це систематизує підхід. Додатково звертати увагу на пояснення автоматизації: використання програм для фільтрації сигналів від датчиків вібрації. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де збільшення вибірки з 3 до 10 зразків знизило довірчий інтервал на 30 %.

Рекомендується знайти дані про метрологічне забезпечення в лабораторіях. Для контролю скласти план підвищення точності для тесту гальмівного шляху, вказавши кроки, інструменти та очікувані показники. Такий підхід забезпечить практичні інструменти для мінімізації ризиків хибних висновків при оцінці складних технічних систем.

6. Узагальнення результатів на партію

При розгляді цього пункту акцент на пошуку матеріалів про статистичні методи екстраполяції даних з вибірки на всю партію виробів. У відкритих джерелах шукати пояснення вибіркового контролю, розрахунку довірчих інтервалів, оцінки ризику виробника і споживача, застосування планів за ГОСТ 20736.

Звертати увагу на те, що узагальнення базується на припущенні однорідності партії. Під час пошуку рекомендується знайти приклади для партії гальмівних колодок, де за результатами 10 зразків робиться висновок про всю тисячу. Важливо зрозуміти, що обсяг вибірки залежить від рівня дефектності та допустимого ризику.

Самостійно скласти алгоритм узагальнення для партії шин, вказавши формули для середнього, дисперсії, граничних значень. Це закріпить статистичний підхід. Додатково звертати увагу на брак партії. У відкритих джерелах часто наводяться приклади. Рекомендується знайти плани контролю. Для контролю скласти розрахунок для трансмісії. Такий підхід підготує до сертифікації.

7. Документальне оформлення результатів

При вивченні цього пункту слід розпочати з пошуку у відкритих джерелах матеріалів, які детально описують структуру, зміст і вимоги до документів, що фіксують хід і підсумки випробувань. У мережі доступні освітні ресурси, де протокол випробувань визначається як офіційний документ, що містить мету, об'єкт, умови, методику, обладнання, первинні дані, оброблені результати, похибки, висновки та підписи відповідальних осіб.

Звертати увагу на те, що оформлення регулюється стандартами, наприклад, ГОСТ 15.309 для нехарчової продукції, де передбачено розділи: титульний лист, зміст, вступ, опис методики, таблиці та графіки, аналіз, додатки з сирими даними. Під час пошуку рекомендується знайти зразки протоколів стендових випробувань двигуна на потужність, де чітко видно нумерацію вимірювань, одиниці, калібрування датчиків і статистичну обробку.

Важливо зрозуміти, що документальне оформлення забезпечує відтворюваність, юридичну силу та можливість аудиту. Для поглиблення шукати приклади актів ходових випробувань автомобіля з фіксацією погодних умов, маршруту, показників прискорення та витрати палива. Самостійно скласти шаблон протоколу для ресурсного тесту трансмісії, включивши всі обов'язкові розділи, таблиці для середніх значень, графіки залежностей і поле для висновків про відповідність ТУ. Це дозволить відпрацювати структуру.

Додатково звертати увагу на пояснення додатків: осцилограми, фото дефектів, сертифікати калібрування. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де неповне оформлення призводило до відмови в сертифікації. Рекомендується знайти форми звітів про експлуатаційні випробування шин з підписами комісії. Для контролю розуміння заповнити уявний протокол для оцінки вібрації підвіски, вказавши реальні одиниці, похибки та рекомендації. Такий підхід сформує навички створення документів, які є основою для прийняття рішень про серійний випуск чи доопрацювання транспортних систем.

8. Аналіз адекватності та чутливості методів

Опрацьовуючи цей пункт, необхідно зосередитися на пошуку матеріалів, які пояснюють перевірку відповідності обраного методу поставленій задачі та його реакцію на зміну параметрів. У відкритих джерелах шукати пояснення адекватності як ступеня відповідності моделі

чи методу реальному процесу, а чутливості – як зміни результату при варіюванні входів. Звертати увагу на методи оцінки: порівняння з еталонними тестами, аналіз залишків, коефіцієнти кореляції, діаграми розсіювання. Під час пошуку рекомендується знайти приклади аналізу адекватності математичної моделі згоряння в двигуні шляхом зіставлення розрахунків з експериментом.

Важливо зрозуміти, що адекватність підтверджується статистичними критеріями, наприклад, F-критерієм Фішера, а чутливість – похідними чи методом Монте-Карло. Для закріплення шукати статті про чутливість стендового методу до температури навколишнього середовища. Самостійно скласти план аналізу для методу вимірювання гальмівного шляху: перевірка адекватності через повторення на різних покриттях, розрахунок чутливості до маси автомобіля.

Це систематизує оцінку. Додатково звертати увагу на пояснення неадекватності через спрощення моделі. У відкритих джерелах часто наводяться приклади, де низька чутливість методу пропускала дефекти. Рекомендується знайти дані про аналіз для вібраційних тестів. Для контролю скласти звіт з критеріями для трансмісії. Такий підхід забезпечить критичне оцінювання методів.

Питання для самоперевірки

1. Яка схема формування результатів випробувань?
2. Назвіть точностні характеристики результатів.
3. Як формуються результати контрольних тестів?
4. У чому особливості повторних випробувань?
5. Які методи підвищення точності?
6. Як узагальнюються результати на партію?
7. Як документуються результати випробувань?
8. Що таке адекватність методу випробувань?
9. Наведіть приклад підвищення точності.
10. Яка роль чутливості методу в аналізі?

2.2.14 Тема 13. Частина 2 Сертифікація складних технічних систем

Опрацювання цієї теми є логічним завершенням курсу, оскільки сертифікація виступає як фінальна форма державного або незалежного

підтвердження якості та безпеки технічної системи, що базується на результатах усіх попередніх досліджень та випробувань.

Необхідно усвідомити, що сертифікація – це не просто формальність, а інструмент забезпечення довіри між виробником, споживачем та регулюючими органами. Вона інтегрує в собі вимоги щодо надійності, безпеки, екологічності, які були кількісно оцінені під час випробувань. Слід глибоко розібратися у відмінностях між міжнародними, регіональними та національними системами, зрозуміти особливості застосування статистичних методів у процесі сертифікації та роль менеджменту якості у забезпеченні сталої відповідності вимогам. Це дозволить інженеру-досліднику грамотно організувати роботу з підготовки продукції до виходу на ринок.

1. Основні поняття сертифікації

Сертифікація – це процедура, за допомогою якої незалежний орган документально засвідчує, що продукція, процес, послуга або система управління якістю відповідає встановленим вимогам, визначеним у стандартах, технічних регламентах або інших нормативних документах. Це офіційне підтвердження є ключовим елементом технічного регулювання і слугує кільком важливим цілям: захист прав споживачів (гарантія безпеки та якості придбаного товару), забезпечення добросовісної конкуренції (всі учасники ринку дотримуються однакових мінімальних вимог) та усунення технічних бар'єрів у торгівлі.

Серед ключових понять слід розрізняти об'єкт сертифікації (технічна система, її елемент чи процес), суб'єкт сертифікації (виробник або постачальник) та орган із сертифікації (незалежна, акредитована структура, яка проводить процедуру). Також важливою є диференціація між обов'язковою сертифікацією (для продукції, що впливає на безпеку, життя, здоров'я та довкілля, і регулюється технічними регламентами) та добровільною сертифікацією (проводиться за ініціативою виробника для підтвердження додаткових якісних характеристик).

Складність цього процесу полягає у необхідності аналізу та валідації результатів випробувань, які можуть бути проведені як власною, так і незалежною лабораторією. Орган із сертифікації не проводить нові випробування, він аналізує протоколи випробувань та аудиту виробництва, використовуючи їх як доказову базу для видачі сертифіката відповідності або декларації про відповідність. Саме на цьому

етапі виявляється вся важливість коректного планування та проведення випробувань, про що йшлося у попередніх темах курсу.

2. Міжнародні системи сертифікації

Міжнародні системи сертифікації є критично важливими для компаній, які прагнуть вийти на глобальні ринки, оскільки вони забезпечують уніфікацію вимог та взаємне визнання результатів оцінки відповідності між країнами.

Найвпливовішою є Міжнародна організація зі стандартизації (ISO), хоча сама ISO не проводить сертифікацію, вона розробляє стандарти, на основі яких створюються сертифікаційні системи. Ключовими для технічних систем є стандарти серії ISO 9000 (системи менеджменту якості), ISO 14000 (екологічний менеджмент), а також спеціалізовані стандарти, як-от ISO/TS 16949 для автомобільної промисловості.

Сертифікація за цими стандартами засвідчує не якість самого виробу, а надійність системи, за якою цей виріб виробляється, що є непрямим, але потужним показником стабільності якості. Іншою важливою структурою є Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), яка розробляє стандарти та системи оцінки відповідності для електротехнічної та електронної продукції.

Наприклад, Система IECEE-CB (Схема CB) дозволяє виробникам електричних приладів отримати один протокол випробувань, який визнається більшістю країн-членів, що значно спрощує експорт. Ці міжнародні системи ґрунтуються на принципі добровільності (хоча на практиці сертифікат ISO часто є обов'язковою умовою для участі в міжнародних тендерах) та спрямовані на гармонізацію національних вимог. Вони створюють рамкові правила та довіру, необхідну для глобальної торгівлі, забезпечуючи виробникам можливість використовувати єдині, уніфіковані методики випробувань та контролю якості. Це допомагає інженеру-досліднику орієнтуватися на єдині, найвищі, стандарти при розробці програми випробувань.

3. Регіональні системи сертифікації

Регіональні системи сертифікації створюються в межах економічних або політичних блоків, їхня мета – забезпечити вільний рух товарів усередині регіону шляхом уніфікації технічних вимог та процедур оцінки відповідності, усуваючи внутрішні торговельні бар'єри.

Найяскравішим і найвпливовішим прикладом є Система Європейського Союзу, яка використовує маркування CE (Conformité Européenne).

Маркування CE не є знаком якості, а засвідчує відповідність продукції усім застосовним директивам та технічним регламентам ЄС (наприклад, щодо низьковольтного обладнання, електромагнітної сумісності, безпеки машин). У більшості випадків, виробник самостійно оформлює Декларацію про відповідність ЄС після проведення всіх необхідних випробувань та аудиту.

Для продукції підвищеної небезпеки залучаються Нотифіковані органи (Notified Bodies) для проведення незалежної оцінки. Іншим прикладом є системи, що діють у рамках Євразійського економічного союзу (ЄАЕС), де застосовується маркування EAC (Євразійська відповідність), яке також підтверджує відповідність єдиним технічним регламентам союзу.

Розуміння регіональних систем є критичним для виробників складних технічних систем, оскільки вихід на той чи інший ринок вимагає перевірки відповідності не лише загальноприйнятим міжнародним стандартам, а й специфічним регіональним регламентам. Це часто означає необхідність проведення додаткових, унікальних для даного регіону, випробувань, наприклад, на електромагнітну сумісність або вібростійкість відповідно до місцевих нормативних документів.

4. Національні системи сертифікації

Національні системи сертифікації діють у межах окремої держави та регулюються її законодавством. Вони встановлюють обов'язкові вимоги до безпеки та якості продукції, що реалізується на території цієї країни, і часто є юридичною вимогою для місцевих виробників та імпортерів.

Кожна країна має свій національний орган зі стандартизації та сертифікації, який контролює застосування національних стандартів (наприклад, ДСТУ в Україні, ГОСТ у пострадянських країнах, ANSI в США). Хоча відбувається постійний процес гармонізації національних стандартів з міжнародними (ISO/IEC), у багатьох сферах, особливо в оборонній промисловості, будівництві чи специфічних транспортних галузях, можуть існувати унікальні, виключно національні вимоги, які необхідно підтвердити.

Наприклад, в деяких країнах можуть бути більш жорсткі норми до сейсмічної стійкості обладнання чи специфічні вимоги до екологічності, пов'язані з місцевими кліматичними умовами. Сертифікація в національній системі, як правило, передбачає обов'язкове залучення акредитованих національних випробувальних лабораторій для отримання протоколів випробувань. Це забезпечує державний контроль над якістю продукції та захистом внутрішнього ринку.

Водночас, для стимулювання міжнародної торгівлі, національні системи активно укладають двосторонні та багатосторонні угоди про взаємне визнання результатів сертифікації, що дозволяє зменшити дублювання випробувань та спростити імпорт/експорт. Інженер-дослідник повинен завжди перевіряти, чи існує національний еквівалент міжнародного стандарту, і чи не вимагає місцеве законодавство проходження додаткової обов'язкової сертифікації, навіть якщо продукт вже має міжнародний сертифікат.

5. Статистичні методи при сертифікації

Статистичні методи є незамінним інструментом у процесі сертифікації, особливо при оцінці надійності, довговічності та контролі якості серійної продукції. Оскільки неможливо випробувати кожен виріб із партії, рішення про відповідність усієї партії приймається на основі вибіркових даних, що вимагає використання статистичних методів для забезпечення достовірності висновків.

Основними статистичними методами, що застосовуються, є:

1) Вибірковий контроль (Acceptance Sampling): методи, які дозволяють визначити мінімально необхідний обсяг вибірки n та допустиму кількість дефектних виробів c, щоб з заданою ймовірністю (ризик замовника та ризик виробника) прийняти рішення про прийняття або відхилення всієї партії. Це критично важливо для контролю вхідних компонентів та готової продукції.

2) Статистичний аналіз надійності: використання методів математичної статистики для оцінки імовірнісних показників надійності (наприклад, середній час напрацювання до відмови M(T) або ймовірність безвідмовної роботи P(t)) на основі обмеженої кількості зразків, випробуваних до відмови. Це включає побудову довірчих інтервалів, які кількісно оцінюють точність оцінки показників надійності.

3) Статистичне управління процесами (Statistical Process Control, SPC): застосування контрольних карт для моніторингу та забезпечення

стабільності технологічних процесів у виробництві. Це непрямо підтверджує, що характеристики продукції не змінюються з часом, що є вимогою для сертифікації систем менеджменту якості. Таким чином, статистичні методи забезпечують науково обґрунтовану основу для прийняття рішення «пройшов/не пройшов», мінімізуючи як ризик випуску небезпечної продукції, так і невиправдані витрати на надлишкові випробування.

6. Особливості сертифікації складних систем

Сертифікація складних технічних систем (наприклад, літаків, залізничних потягів, великих енергетичних установок) має суттєві особливості, які відрізняють її від сертифікації простої продукції.

1) Модульність та ієрархія: Складна система складається з багатьох підсистем і компонентів, кожен з яких може мати свій власний сертифікат. Процес сертифікації системи вимагає не лише перевірки фінального виробу, а й валідації коректної інтеграції та сумісності всіх сертифікованих компонентів. Відмова одного елемента може спричинити катастрофічну системну відмову, тому акцент робиться на системному аналізі безпеки та надійності.

2) Роль програмного забезпечення (ПЗ): У сучасних складних системах значна частина функціональності та безпеки реалізується через ПЗ. Сертифікація ПЗ (наприклад, за стандартами DO-178C в авіації) є окремим, вкрай складним процесом, який вимагає перевірки коду, алгоритмів, тестування на відмовостійкість та відсутності непередбачених помилок.

3) Тривалість та вартість: Випробування складних систем (наприклад, ресурсні випробування) є надзвичайно тривалими та дорогими, що вимагає широкого застосування методів прискорених випробувань та моделювання з обов'язковою подальшою валідацією.

4) Багаторівнева відповідність: Складна система часто повинна відповідати одночасно десяткам різних регламентів (механічна безпека, електромагнітна сумісність, екологія, кібербезпека), що вимагає інтеграції декількох сертифікаційних процесів.

Через ці особливості, сертифікація складних систем часто здійснюється за схемами з обов'язковим аудитом виробництва та подальшим наглядовим контролем протягом усього життєвого циклу продукту.

7. Сертифікація і менеджмент якості

Сертифікація системи менеджменту якості (СМЯ) та сертифікація продукції – це два тісно пов'язані, але різні процеси. Сертифікація продукції (про що йшлося вище) підтверджує відповідність самого виробу встановленим вимогам. Натомість, сертифікація СМЯ (наприклад, за стандартом ISO 9001) підтверджує, що процеси, які використовуються для розробки, виробництва та постачання продукції, є систематичними, контрольованими та спрямованими на постійне покращення.

Наявність сертифікованої СМЯ є величезною перевагою, а часто і обов'язковою передумовою, для сертифікації продукції. Причина в тому, що надійна система менеджменту якості забезпечує стабільність характеристик продукції з часом, гарантуючи, що виріб, виготовлений через рік, матиме такі ж показники, як і зразок, що пройшов випробування.

Орган із сертифікації продукції, перевіряючи протоколи випробувань, також проводить аудит виробництва і, якщо СМЯ сертифікована, це значно спрощує аудит, оскільки вже є доказ того, що:

1) Процеси контролю якості (вхідний, операційний, вихідний) встановлені.

2) Засоби вимірювань регулярно калібруються.

3) Персонал компетентний.

4) Уся документація (креслення, технологічні карти, протоколи випробувань) контролюється.

Таким чином, СМЯ створює довірче середовище, в якому результати випробувань одного зразка можуть бути з більшою впевненістю поширені на всю серійну продукцію, що значно знижує витрати та ризики всього процесу сертифікації.

8. Процедура отримання сертифіката відповідності

Процедура отримання сертифіката відповідності для технічної системи є формалізованим багатоетапним процесом, який, хоча й може мати регіональні відмінності, має загальну універсальну логіку.

1) Подання заявки та визначення схеми сертифікації: Виробник подає заявку до акредитованого органу із сертифікації. На цьому етапі спільно визначається схема сертифікації (наприклад, сертифікація одиничного виробу, серійна продукція з аудитом СМЯ, партія).

2) Аналіз технічної документації: Орган аналізує надану документацію (технічні умови, конструкторська документація, результати системного аналізу безпеки, протоколи попередніх випробувань, технічні регламенти, які застосовуються).

3) Проведення випробувань: Якщо наявні протоколи випробувань недостатні або їхня достовірність викликає сумніви, орган направляє зразки до акредитованої випробувальної лабораторії для проведення контрольних або повних сертифікаційних випробувань (наприклад, на надійність, безпеку, електромагнітну сумісність).

4) Аудит виробництва (за необхідності): Для серійної продукції проводиться аудит виробничих умов та системи контролю якості (СМЯ) для підтвердження того, що виробник здатен стабільно випускати продукцію, що відповідає вимогам.

5) Прийняття рішення: На основі аналізу всіх доказів (протоколи випробувань, звіт про аудит, аналіз документації) орган із сертифікації приймає рішення про видачу сертифіката відповідності.

6) Видача сертифіката та нанесення маркування: У разі позитивного рішення видається сертифікат, і виробник отримує право наносити відповідне маркування (наприклад, CE, EAC, національний знак відповідності).

7) Наглядовий контроль: Протягом терміну дії сертифіката орган може проводити періодичні наглядові аудити та контрольні випробування для підтвердження того, що відповідність зберігається. Ця процедура вимагає тісної співпраці інженера-дослідника з метрологічною та юридичною службами підприємства.

Питання для самоперевірки

1. Які основні поняття сертифікації?
2. Назвіть міжнародні системи сертифікації.
3. У чому особливості регіональних систем?
4. Як працюють національні системи сертифікації?
5. Які статистичні методи застосовуються?
6. Які особливості сертифікації складних систем?
7. Як пов’язана сертифікація з менеджментом?
8. Яка процедура отримання сертифіката?
9. Наведіть приклад знака відповідності.
10. Хто проводить іспитову лабораторію?

3 ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНІ РОБОТИ

Студенти заочної форми навчання відповідно до програми курсу «Дослідження та випробування технічних систем» самостійно вивчають літературу, що рекомендується, і виконують одну контрольну роботу, яка складається з трьох питань.

Залік по контрольній роботі студент одержує при особистій співбесіді з викладачем. Оформляти роботу рекомендується на аркушах формату А4 (210х297), зброшурованих і закріплених у швидкозшивачі. При оформленні роботи слід керуватися вимогами ДСТУ 3008-95 - «Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення». При виконанні контрольної роботи необхідно пояснювати текст схемами і рисунками в масштабі. На обкладинці роботи треба вказати: назву предмета; прізвище, ім'я, по батькові студента; шифр; спеціальність; номер залікової книжки; домашню адресу (для іногородніх) з поштовим індексом; дату виконання. Контрольна робота повинна бути підписана студентом.

Матеріал контрольної роботи розташовується в наступному порядку:

- титульний лист;
- теоретична частина;
- графічна частина;
- висновки;
- перелік посилань.

Наприкінці роботи обов'язково необхідно привести список використаної літератури та електронних джерел, на які наведені посилання в контрольній роботі, з обов'язковим зазначенням по кожному літературному джерелу прізвища та ініціалів автора, назви книги, місця видання, видавництва і року видання, URL електронного ресурсу.

Контрольна робота повинна бути особисто підписана студентом. Залік по контрольній роботі студент одержує при особистій співбесіді з викладачем.

3.1 Список варіантів контрольних робіт

ВАРІАНТ 1

1. Дайте визначення технічної системи та поясніть її модель

(входи, виходи, структура, оточення) на прикладі автомобіля.
2. Опишіть історичний етап переходу від парових до електричних двигунів у транспортних засобах і мотивацію цього кроку.
3. Класифікуйте види випробувань (стендові, ходові, експлуатаційні) та вкажіть їхні задачі для оцінки надійності гальмівної системи.

ВАРІАНТ 2

1. Поясніть відносність понять «елемент» і «система» на прикладі двигуна внутрішнього згоряння.
2. Назвіть ключові тенденції еволюції транспортних систем (мініатюризація, автоматизація, екологізація) і наведіть приклади їхнього прояву.
3. Як планується програма прискорених випробувань на довговічність трансмісії автомобіля?

ВАРІАНТ 3

1. Опишіть структуру технічної системи та її взаємозв’язок з оточенням на прикладі гусеничної машини.
2. Які зовнішні фактори впливають на еволюцію технічних систем? Наведіть приклади з кранобудування.
3. Поясніть роль датчиків і підсилювачів у вимірювальному ланцюзі стендових випробувань двигуна.

ВАРІАНТ 4

1. Наведіть класифікацію рівнів технічних систем і приклад для колісного транспортного засобу.
2. Як здійснюється управління процесом технічного розвитку на стадії НДДКР?
3. Опишіть методи вимірювання зношення поршневої групи двигуна та їхню точність.

ВАРІАНТ 5

1. Які загальні ознаки характеризують технічну систему? Наведіть приклади для шасі автокрана.

2. Поясніть принципи прогнозування технічного розвитку транспортних засобів.
3. Як обробляються експериментальні дані та перевіряються статистичні гіпотези при випробуваннях?

ВАРІАНТ 6

1. Опишіть ієрархію властивостей у транспортних системах (функціональні, експлуатаційні, економічні).
2. Які етапи життєвого циклу системи від проектування до утилізації?
3. Назвіть основні показники надійності та формули їхнього розрахунку для автомобіля.

ВАРІАНТ 7

1. Поясніть відношення між властивостями (наприклад, маса та паливна економічність) і їхній вплив на конструкцію.
2. Як розподіляються операції між виконавцями на етапі серійного виробництва?
3. Опишіть план випробувань на надійність гальмівної системи з урахуванням статистичних методів.

ВАРІАНТ 8

1. Які методи оцінювання властивостей технічної системи Ви знаєте? Наведіть приклад для маневреності.
2. Яка роль випробувань у проектуванні та створенні технічних систем?
3. Як формується протокол стендових випробувань двигуна на потужність?

ВАРІАНТ 9

1. Опишіть категорії властивостей технічних систем і конфлікти між ними на прикладі автомобіля.
2. Поясніть інтеграцію випробувань у життєвий цикл системи.
3. Які типи відмов характерні для трансмісії та як вони класифікуються?

ВАРІАНТ 10

1. Наведіть перелік необхідних властивостей для гусеничної техніки та критерії їхнього вибору.
2. Які особливості етапів створення для одиничного виробництва?
3. Поясніть мету фізичного моделювання аеродинаміки автомобіля.

ВАРІАНТ 11

1. Як будується ієрархія властивостей у двигунах внутрішнього згоряння?
2. Опишіть задачі експериментальних досліджень на стадії концептуального проектування.
3. У чому переваги імітаційного моделювання порівняно з фізичним?

ВАРІАНТ 12

1. Поясніть взаємозв'язок еволюції систем з підвищенням їхньої надійності.
2. Як організовуються експериментальні дослідження для нової трансмісії?
3. Опишіть калібрування датчика тиску в системі охолодження двигуна.

ВАРІАНТ 13

1. Які принципи лежать в основі систем контролю та випробувань?
2. Опишіть послідовність стадій створення технічної системи.
3. Як узагальнюються результати випробувань на партію автомобілів?

ВАРІАНТ 14

1. Назвіть історичні етапи еволюції колісних транспортних засобів.

2. Поясніть класифікацію контролю (вхідний, операційний, приймальний).
3. Які методи підвищення точності результатів випробувань Ви можете запропонувати?

ВАРІАНТ 15

1. Як мотивація НДДКР впливає на вибір конструктивних рішень у машинобудуванні?
2. Опишіть загальну схему експериментальних досліджень для шасі.
3. Поясніть процедуру отримання сертифіката відповідності для автомобіля.

ВАРІАНТ 16

1. Які зовнішні фактори (економічні, екологічні) впливають на еволюцію систем?
2. Як інтегруються випробування у життєвий цикл системи?
3. Назвіть міжнародні системи сертифікації та їхні особливості для транспортних засобів.

ВАРІАНТ 17

1. Поясніть принципи побудови систем випробувань технічних систем.
2. Які етапи використання технічної системи після виробництва?
3. Як статистичні методи застосовуються при сертифікаційних випробуваннях?

ВАРІАНТ 18

1. Опишіть модельний експеримент у вимірюваннях зношення шин.
2. Як еволюція пов’язана з підвищенням надійності автомобілів?
3. Поясніть роль менеджменту якості в процесі сертифікації.

ВАРІАНТ 19

1. Які ризики виникають під час ходових випробувань і заходи

безпеки?
2. Опишіть класифікацію дефектів у двигунах внутрішнього згоряння.
3. Як оформлюються результати випробувань на надійність?

ВАРІАНТ 20

1. Поясніть задачі моделювання в дослідженнях керованості автомобіля.
2. Як планується експеримент для оцінки стійкості на повороті?
3. Опишіть національні системи сертифікації в Україні для кранів та транспортних засобів.

ВАРІАНТ 21

1. Які недоліки фізичного моделювання в аеродинамічній трубі?
2. Опишіть стендове обладнання для випробувань гальм.
3. Як вплив результатів випробувань на конструктивні рішення двигуна?

ВАРІАНТ 22

1. Поясніть адекватність математичної моделі опору коченню.
2. Які методи фіксації даних застосовуються при дорожніх випробуваннях?
3. Опишіть структурну схему формування результатів контрольних випробувань.

ВАРІАНТ 23

1. Як забезпечити безпеку при форсованих випробуваннях трансмісії?
2. Назвіть показники надійності (MTBF, інтенсивність відмов) і їхній розрахунок.
3. Поясніть особливості сертифікації складних систем за Euro NCAP.

ВАРІАНТ 24

1. Опишіть програмне забезпечення для обробки сигналів у випробуваннях.
2. Які етапи підготовки до експерименту для двигуна?
3. Як повторні випробування впливають на узагальнення результатів?

ВАРІАНТ 25

1. Поясніть класифікацію похибок вимірювань і їхній вплив на результати.
2. Як мотивація досліджень впливає на вибір гібридних установок?
3. Опишіть іспитову лабораторію в процесі сертифікації.

ВАРІАНТ 26

1. Які принципи метрологічного забезпечення стендового обладнання?
2. Опишіть життєвий цикл гусеничної машини від ідеї до утилізації.
3. Як аналіз чутливості методу впливає на планування випробувань?

ВАРІАНТ 27

1. Поясніть інтеграцію засобів у комплексні вимірювальні системи.
2. Які тенденції технічного розвитку в електромобілях?
3. Опишіть декларацію відповідності та знак відповідності.

ВАРІАНТ 28

1. Як вибрати метод вимірювання залежно від параметра (температура, вібрація)?
2. Опишіть розподіл стадій між конструктором і технологом.
3. Яка роль ISO 9001 у сертифікації автомобільного виробництва?

ВАРІАНТ 29

1. Поясніть автоматизацію вимірювального процесу в діагностиці.
2. Які принципи прогнозування еволюції гусеничних систем?
3. Як документуються результати експлуатаційних випробувань?

ВАРІАНТ 30

1. Опишіть математичне моделювання процесу згоряння в двигуні.
2. Як попередні результати впливають на планування наступних випробувань?
3. Поясніть регіональні системи сертифікації (ЄС) для транспортних засобів.

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАХОДИ З ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ЗАСВОЄННЯ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ДИСЦИПЛІНИ

На підставі робочої програми дисципліни та вимог організації навчального процесу, кафедра розробляє контрольні заходи з перевірки якості засвоєння студентом навчального матеріалу дисципліни. Контрольні заходи з дисципліни «Дослідження та випробування технічних систем» передбачають наступне:

- опитування за окремими темами лекційного курсу;
- виконання тестових письмових робіт на рубіжному контролі;
- виконання та захист практичних робіт;
- виконання та захист контрольних робіт;
- складання заліку.

Для закріплення поточних знань протягом семестру, до проведення підсумкового модульного контролю, проводяться контрольні заходи (письмове опитування студентів за матеріалами лекцій, що були прочитані), на підставі яких студент отримує загальну оцінку.

При виконанні письмової роботи, студенти одержують завдання по висвітленню певних теоретичних питань або розв'язку завдань. Робота виконується студентом письмово й здається викладачеві. При цьому оцінюються володіння матеріалом по темі роботи, аналітичні

здатності студента, його володіння методами, уміння й навички, необхідні для виконання завдань.

Залік націлений на комплексну перевірку освоєння дисципліни. Залік проводиться в усній або письмовій формі по білетах, у яких наводяться питання (завдання) по всіх темах курсу. Студенту дається час на підготовку. Оцінюється володіння матеріалом, його системне освоєння, здатність застосовувати потрібні знання, навички й уміння при аналізі проблемних ситуацій і вирішенні практичних завдань.

Слід зазначити, що всі заплановані заходи мають бути складені позитивно. Негативна оцінка з будь якого контрольного заходу свідчить про незасвоєння студентом навчального матеріалу.

Студент, який одержав за результатами модульного контролю позитивні оцінки, виконав всі завдання, що передбачені робочим навчальним планом дисципліни допускається до складання заліку.

Студент, який отримав на модульному контролі незадовільну оцінку або не з'явився на нього, має можливість повторного складання протягом одного-двох тижнів.

5 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Надається перелік навчальної та довідникової літератури, що рекомендується при вивченні дисципліни «Дослідження та випробування технічних систем». Слід мати на увазі, що джерела, які можуть бути використані студентом для самопідготовки при вивченні дисципліни, не обмежуються тільки цим, наведеним нижче переліком літератури.

Базова

1. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В. та ін. Дослідження та випробування технічних систем : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 212 с.
2. Герасимчук О.Н. Теорія технічних систем: навч. посіб. для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 112 с.
3. Болвашенков І., Каммерманн Й., Френкель І., Герцог Х.-Г. Багаторівнева ієрархічна модель надійності технічних систем: теорія та застосування. In: Ram, M., Pham, H. (eds) Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Series in Reliability

Engineering. Springer, Cham, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-31375-3_5.
4. Гордєєв О.Ф., Захаров П.О. Методики моделювання при дослідженні та проектуванні верстатів і технологічних систем: навч. посіб. Луцьк: ЛДТУ, 2003. 258 с.
5. Горшкова О.О. Концепція дослідницької підготовки студентів у контексті компетентнісно орієнтованої технічної освіти. International Journal of Applied Exercise Physiology. 2019. Т. 8, № 2.1. С. 147–159.

Допоміжна

6. Журахівський А. В., Яцейко А. Я., Дьяченко Н. Б. Основи технічної творчості та наукових досліджень: навч. посіб. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. 380 с.
7. Катренко А.В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: навч. посіб. Львів: Новий світ, 2000. 424 с.
8. Косіюк М.М., Черменський Г.П. Основи науково-технічної творчості: навч. посіб. Хмельницький: Поділля, 1998. 451 с.
9. Косіюк М.М., Черменський Г.П. Практикум з курсу "Основи науково-технічної творчості". Хмельницький: Поділля, 1998. 280 с.
10. Кравець С.В., Нечидюк А.А., Романовський О.Л. Теорія технічних систем: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2015. 139 с.
11. Крупа В.В. Теорія технічних систем: особливості побудови, створення та розвитку: навч. посіб. Тернопіль: Осадца Ю.В., 2023. 308 с.
12. Кузнєцов Ю.М. Патентознавство та авторське право: підруч. К. : Кондор, 2009. 446 с.
13. Кузнєцов Ю.М. Теорія розв’язання творчих задач. К. : ТОВ «ЗМОК» - ПП «ГНОЗІС», 2003. 294 с.
14. Кузнєцов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А. Теорія технічних систем: навч. посіб. / за ред. Ю.М. Кузнєцова. К. ; Тернопіль, 1998. 310 с.
15. Кузнєцов Ю.М., Новосьолов Ю.К., Луців І.В. Теорія технічних систем: підруч. Севастополь: СевНТУ, 2011. 246 с.
16. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління / за заг. ред. проф. Ю.М. Кузнєцова. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с.
17. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів

металообробних верстатів: монографія / за заг. ред. Ю.М. Кузнєцова. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.
18. Кузнєцов Ю.М., Скляров Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посіб. / за ред. Ю.М. Кузнєцова. К. : ТОВ «ЗМОК» - ПП «ГНОЗІС», 2004. 323 с.
19. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Теорія технічних систем. К. : ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.
20. Марчук В.І., Лук'янович Ю.А., Мельник С.А. Вступ до спеціальності (про інженерне мислення): навч. посіб. Луцьк: Волиньполіграф, 2016. 180 с.
21. Мигаль В.Д. Теорія і методи наукової творчості: навч. посіб. Х. : ВД «ІНЖЕК», 2007. 424 с.
22. Настасенко В.А. Морфологічний аналіз – метод синтезу тисяч винаходів: монографія. 2-ге вид., перероб. і доп. Херсон: Айлант, 2015. 100 с.
23. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: навч. посіб. Київ: УкрНДІАТ, 2004. 383 с.
24. Раусанд М., Хойланд А. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 3rd Edition. 2020. 864 p.
25. Сахно Є. Ю., Терещук О. І., Чуприна В. М., Коваленко С. В. Основи системотехніки: навч. посіб. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. 280 с.
26. Севостьянов І. В. Теорія технічних систем: підруч. Вінниця: ВНТУ, 2014. 181 с.
27. Сидорчук О.В. Інженерія машинних систем: монографія. К. : ННЦ «ІМЕСГ» УААН, 2007. 263 с.
28. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів. К. : Либідь, 2000. 272 с.
29. Хелемендик М.М., Люлька Г.І., Хелемендик І.М. Теорія технічних систем АПК: навч. посіб. / за заг. ред. проф. М.М. Хелемендика. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2003. 196 с.
30. Чорней Н.Б., Чорней Р.К. Теорія систем і системний аналіз: навч. посіб. для студ. вищ. навч. заклад. К. : МАУП, 2005. 236 с.
31. Швець С.В., Швець У.С. Основи системного аналізу: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2017. 126 с.
32. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. К. : Наукова думка, 2002. 288 с.
33. Goel H., Grievink J., Herder P., Weijnen M. Optimal reliability design

of process systems at the conceptual stage of design. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003. 2003. P. 40–45. doi: 10.1109/RAMS.2003.1181900.

Інформаційні ресурси

34. Coursera, edX, Udemy – платформи з онлайн-курсами з теорії технічних систем, системного аналізу, моделювання та оптимізації.
35. IEEE Xplore Digital Library – цифрова бібліотека, що містить наукові статті, конференційні матеріали та стандарти в галузі інженерії та технічних систем.
36. SpringerLink – доступ до наукових статей, книг і журналів, що охоплюють сучасні дослідження в галузі технічних систем та інженерії.